



**Patrícia Isabel Soares Barbosa**

Licenciatura em Ciências de Engenharia e Gestão Industrial

## **Monitorização do Estado de Condição de Equipamentos com Recurso a Cartas de Controlo Estatístico**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia e Gestão Industrial

Orientador: Prof. Doutor José Gomes Requeijo – Faculdade de Ciências e  
Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa

Co-Orientador: Eng<sup>a</sup> Susana da Silva Lampreia – Escola Naval

Juri:

Presidente: Prof. Doutor Rogério Salema de Araújo Puga Leal

Arguente: Prof. Doutor José António Mendonça Dias

Vogais: Prof. Doutor José Gomes Requeijo

Eng<sup>a</sup> Susana da Silva Lampreia



**FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

**Julho de 2012**

**Patrícia Isabel Soares Barbosa**

Licenciatura em Ciências de Engenharia e Gestão Industrial

## **Monitorização do Estado de Condição de Equipamentos com Recurso a Cartas de Controlo Estatístico**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia e Gestão Industrial

Orientador: Prof. Doutor José Gomes Requeijo – Faculdade de Ciências e  
Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa  
Co-Orientador: Eng<sup>a</sup> Susana da Silva Lampreia – Escola Naval

**Março de 2012**

## Monitorização do Estado de Condição de Equipamentos com Recurso a Cartas de Controlo Estatístico

Copyright © Patrícia Isabel Soares Barbosa, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.





*Ao meu pai, pelo homem maravilhoso que foi*  
*Á minha mãe, pela mulher extraordinária que é*  
*Ao Pedro, por tudo aquilo que me faz ser*



*You'll never know how strong you are, until your only choice is to be strong...*

*A saudade não se descreve...sente-se!*



## **AGRADECIMENTOS**

Esta dissertação representa o final de uma das mais importantes etapas da minha vida. Uma etapa cuja travessia nem sempre se mostrou fácil e cujo sucesso em muito se justifica com a ajuda e incentivo de algumas pessoas. Torna-se por isso fundamental para mim, expressar-lhes o meu profundo agradecimento.

Começo por agradecer ao meu orientador da Faculdade de Ciências e Tecnologia, o Professor Doutor José Requeijo. Agradeço o compromisso assumido para a orientação científica deste trabalho, pela ajuda prestada, transmissão de conhecimento, disponibilidade e pelo incentivo e motivação

À Engenheira Susana Lampreia, professora na Escola Naval, um muito obrigado pelo apoio, interesse, dedicação e disponibilidade. O contributo das suas sugestões e a sua participação activa foram sem dúvida extremamente importantes, bem como o todo seu optimismo constante.

Ao Professor Doutor José Mendonça Dias, os meus sinceros agradecimentos, pelo abrir de portas na realização deste projecto.

Um grande obrigado aos Engenheiros da Escola Naval, com quem tive o privilégio de contactar e que me “acolheram” com simpatia e disponibilidade na Base Naval do Alfeite.

Um agradecimento muito especial à minha família, em particular aos meus pais, que sempre foram os grandes impulsionadores do meu trabalho, do meu empenho e do meu sucesso. A eles o meu enorme obrigado por tudo que me deram, e por me tornarem no que hoje sou.

Ao Pedro um especial agradecimento, pelo apoio incondicional que sempre demonstrou ao longo de todo o percurso académico, mas sobretudo por ter estado ao meu lado nos momentos mais difíceis, nunca me deixando desistir.

Finalmente, mas não menos importante, um agradecimento muito especial aos meus amigos que directa ou indirectamente me ajudaram a ultrapassar as adversidades que foram surgindo ao longo destes últimos anos.



## **RESUMO**

No âmbito da monitorização da condição de equipamentos, o presente trabalho procura aliar técnicas associadas à Qualidade, como é o caso das cartas de controlo, a práticas geralmente associadas à área da Manutenção, como é o caso da análise de vibrações.

A aplicação de métodos estatísticos possui enorme relevância na avaliação da qualidade, revelando-se por isso interessante estudar o seu potencial na análise da condição de um equipamento.

No presente trabalho, a avaliação da condição do equipamento bem como o estudo da tendência da sua degradação, é conseguida aplicando cartas de Somas Acumuladas (*CUSUM*) e cartas da Média Exponencialmente Amortecida (*EWMA*) Modificadas, através das quais se detectam variações no valor médio da vibração resultante do seu funcionamento. Em função dessa análise são estabelecidas regras para as intervenções de manutenção, tendo sempre em atenção o objectivo de maximizar a detecção das potenciais avarias (evitando paragens não programadas) e a minimização de intervenções desnecessárias.

A utilização de cartas de controlo tradicionais implica a verificação de alguns pressupostos como a aleatoriedade, Normalidade e independência dos dados, porém estes nem sempre são verificados. Nestas circunstâncias, as cartas de controlo tradicionais revelam-se uma ferramenta inadequada, uma vez que muitos dos sinais de causas especiais observadas não passam de sinais naturais do processo, transmitindo uma ideia errada do seu comportamento. No presente estudo são abordadas metodologias que permitem ultrapassar essas situações, nomeadamente a modelação dos dados através dos modelos *ARIMA* mais adequados.

Este trabalho foi desenvolvido na Escola Naval, expectando o desenvolvimento de metodologias com aplicação nos programas de manutenção dos navios da Marinha Portuguesa.

**Palavras-Chave:** Monitorização da Condição; Análise de Vibrações; Controlo Estatístico do Processo (SPC); Modelos *ARIMA*; Carta *CUSUM*; Carta *EWMA*





**ABSTRACT**

In the context of equipment condition monitoring, this study intended to combine Quality techniques, as is the case of control charts, to practices generally associated with maintenance area, such as vibrations analysis.

The application of statistical methods has a great relevance in the quality assessment by proving to be interesting to study its potential in equipment condition monitoring.

The evaluation of the equipment condition as well as the study of tendency of its degradation is achieved by applying the cumulative Sum Control charts (*CUSUM*) and Exponentially Weighted Moving Average charts (*EWMA*) modified charts, through which were detected variations in the average value of vibration from equipment operation. It was established rules for maintenance operations with the objective of maximizing the alert for potential failures (avoiding unplanned downtimes) and minimizing unnecessary interventions.

The use of traditional control charts involves checking some assumptions such as randomness, normality and independence of the data, but these are not always checked. In these circumstances, the traditional control charts are an inadequate tool, since many of the observed signals of special causes are merely signs of the natural process, giving a wrong idea of their behavior. In this work were provided methodologies that can overcome such situation that consists in data modeling with the most appropriate *ARIMA* models.

This project was developed at the Naval Academy, hoping new methodologies will be developed with practical applications in Portuguese Navy ships maintenance programs.

**Keywords:** Condition Monitoring; Vibration Analysis; Statistical Process Control (SPC); *ARIMA* models; *CUSUM Chart*; *EWMA Chart*



**ÍNDICE GERAL****Parte I**

<b>Capítulo 1 - Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento do Tema .....	1
1.2 Âmbito .....	2
1.3 Objectivos .....	3
1.4 Metodologia .....	3
1.5 Estrutura da Dissertação .....	4
<b>Capítulo 2 - A Manutenção Industrial.....</b>	<b>7</b>
2.1 Introdução.....	7
2.2 Manutenção industrial.....	7
2.3 Evolução do conceito de manutenção.....	8
2.4 Estratégias de Manutenção .....	9
2.4.1 Manutenção Correctiva .....	10
2.4.2 Manutenção Preventiva .....	11
2.4.3 Manutenção por oportunidade .....	13
<b>Capítulo 3 - Monitorização da Condição .....</b>	<b>15</b>
3.1 Introdução .....	15
3.2 Conceitos fundamentais .....	15
3.3 Monitorização da condição .....	16
3.4 Técnicas de monitorização da condição .....	17
3.4.1 Inspeção visual.....	17
3.4.2 Ultra-som.....	18
3.4.3 Termografia.....	18
3.4.4 Análise dos parâmetros de desempenho .....	19
3.4.5 Líquidos penetrantes .....	19
3.4.6 Tribologia .....	19
3.4.7 Análise de vibrações .....	20
3.5 O futuro da Monitorização da Condição .....	21
<b>Capítulo 4 - Análise de Vibrações .....</b>	<b>23</b>
4.1 Introdução.....	23
4.2 Conceitos básicos sobre vibrações .....	23
4.3 Técnicas de análise de vibrações .....	26

4.4 Equipamentos de medida .....	27
4.5 Norma ISO 2372:2003 (Intensidade da vibração) .....	28
<b>Capítulo 5 - SPC aplicado à manutenção .....</b>	<b>31</b>
5.1 Introdução .....	31
5.2 Conceito de Qualidade .....	32
5.3 Controlo Estatístico do Processo (SPC) .....	34
5.3.1 Cartas de controlo .....	35
5.3.2 Tipos de cartas de controlo .....	39
5.3.3 Condições de aplicabilidade do SPC .....	43
5.4 Cartas de controlo com dados auto-correlacionados .....	47
5.4.1 Estimação dos parâmetros (Fase 1) .....	48
5.4.2 Monitorização do processo (Fase 2) .....	53

## Parte II

<b>Capítulo 6 - Caso de estudo .....</b>	<b>57</b>
6.1 Introdução .....	57
6.2 A Marinha Portuguesa e a Escola Naval .....	57
6.3 Equipamentos utilizados na recolha de dados .....	59
6.3.1 Electrobomba .....	60
6.3.2 Equipamentos de medição .....	60
6.4 Recolha dos dados .....	61
6.4.1 Avaria introduzida .....	63
6.5 Metodologia proposta .....	65
6.6 Análise dos Resultados .....	65
6.6.1 Fase 1 – Estimação dos parâmetros .....	65
6.6.2 Fase 2 - Monitorização .....	74
6.6.2.1 Cartas <i>CUSUM</i> Modificadas .....	77
6.6.2.2 Cartas EWMA Modificadas .....	80
6.6.3 Discussão dos resultados .....	83

## Parte III

<b>Capítulo 7 - Conclusões e trabalhos futuros .....</b>	<b>85</b>
7.1 Conclusões gerais .....	85
7.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	88

<b>Bibliografia .....</b>	<b>89</b>
---------------------------	-----------

<b>ANEXOS.....</b>	<b>93</b>
--------------------	-----------

Anexo I - Factores para construção das Cartas de Controlo .....	95
---	----

Anexo II – Estimação dos parâmetros (Fase 1) .....	97
--	----

Anexo III - Ábacos para cartas CUSUM e EWMA .....	107
---	-----

Anexo IV – Monitorização (Fase 2) .....	113
---	-----



**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 2.1 Estratégias de manutenção .....	10
Figura 4.1 Sistema massa mola.....	24
Figura 4.2 Movimento harmónico simples .....	24
Figura 4.3 Formas de representar a amplitude.....	25
Figura 4.4 Tipos de fixação do acelerómetro.....	28
Figura 4.5 Valores da intensidade da vibração.....	29
Figura 5.1 Carta de Controlo.....	35
Figura 5.2 Regras para detecção de causas especiais de variação .....	38
Figura 5.3 Tipos de cartas de controlo.....	40
Figura 5.4 Função de Auto-Correlação Estimada ( <i>FACE</i> ).....	46
Figura 5.5 Função de Auto-Correlação Parcial Estimada ( <i>FACPE</i> ) .....	47
Figura 6.1 Escola Naval situada na Base do Alfeite (Fonte: Marinha, 2010) .....	59
Figura 6.2 Electrobomba .....	60
Figura 6.3 Equipamento de medição: CSI 2130 da Emerson.....	61
Figura 6.4 Acelerómetro usado na recolha de dados: A0760GP .....	61
Figura 6.5 Representação esquemática dos pontos de recolha na electrobomba.....	62
Figura 6.6 Processo de recolha de dados .....	63
Figura 6.7 Parafusos que foram desapertados aquando da introdução da avaria.....	64
Figura 6.8 Representação das diferentes perturbações introduzidas na electromomba .....	64
Figura 6.9 <i>FACE</i> referente aos dados do ponto 1 .....	66
Figura 6.10 <i>FACPE</i> referente aos dados do ponto 1 .....	67
Figura 6.11 <i>FACE</i> dos resíduos referentes ao ponto 1 .....	68
Figura 6.12 <i>FACPE</i> dos resíduos referentes ao ponto 1 .....	68
Figura 6.13 Cartas de controlo $\bar{x}$ – $MR$ dos resíduos para o ponto 1 .....	69
Figura 6.14 <i>FACE</i> dos resíduos revistos referentes aos ponto 1 .....	70
Figura 6.15 <i>FACPE</i> dos resíduos revistos referentes aos ponto 1 .....	70
Figura 6.16 Carta de controlo $\bar{x}$ – $MR$ dos resíduos revistos para o ponto1 .....	71
Figura 6.17 Verificação da Normalidade dos resíduos revistos referentes ao ponto 1 .....	72
Figura 6.18 Carta <i>CUSUM</i> Modificada (ponto 1) para a 1ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_e$ .....	77

Figura 6.19 Carta CUSUM Modificada (ponto 1) para a 2ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	77
Figura 6.20 Carta CUSUM Modificada (ponto 1) para a 3ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	78
Figura 6.21 Carta CUSUM Modificada (ponto 1) para a 4ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	78
Figura 6.22 Carta CUSUM Modificada (ponto 1) para a 4ª perturbação com $\Delta = 1\sigma_\varepsilon$ .....	79
Figura 6.23 Carta CUSUM Modificada (ponto 1) para a 4ª perturbação com $\Delta = 1,5\sigma_\varepsilon$ .....	79
Figura 6.24 Carta EWMA Modificada (ponto 1) para a 1ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	80
Figura 6.25 Carta EWMA Modificada (ponto 1) para a 2ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	80
Figura 6.26 Carta EWMA Modificada (ponto 1) para a 3ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	81
Figura 6.27 Carta EWMA Modificada (ponto 1) para a 4ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	81
Figura 6.28 Carta EWMA Modificada (ponto 1) para a 4ª perturbação com $\Delta = 1\sigma_\varepsilon$ .....	82
Figura 6.29 Carta EWMA Modificada (ponto 1) para a 4ª perturbação com $\Delta = 1,5\sigma_\varepsilon$ .....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS DOS ANEXOS

Figura II.1.1 FACE e FACPE dos dados referentes ao ponto 2 .....	97
Figura II.1.2 FACE e FACPE dos resíduos referentes ao ponto 2 .....	98
Figura II.1.3 Carta de controlo $e - MR$ dos resíduos do ponto 2.....	98
Figura II.1.4 Verificação da Normalidade dos resíduos revistos referentes ao ponto 2 .....	99
Figura II.2.1 FACE e FACPE dos dados referentes ao ponto 3 .....	100
Figura II.2.2 FACE e FACPE dos resíduos referentes ao ponto 3 .....	100
Figura II.2.3 Carta de controlo $e - MR$ dos resíduos do ponto 3.....	101
Figura II.2.4 Carta de controlo $e - MR$ dos resíduos revistos do ponto 3 .....	102
Figura II.2.5 Verificação da Normalidade dos resíduos revistos referentes ao ponto 3 .....	102
Figura II.3.1 FACE e FACPE dos dados referentes ao ponto 4 .....	103
Figura II.3.2 FACE e FACPE dos resíduos referentes ao ponto 4 .....	103
Figura II.3.3 Carta de controlo $e - MR$ dos resíduos do ponto 4.....	104
Figura II.3.4 Carta de controlo $e - MR$ dos resíduos revistos do ponto 4.....	105



Figura II.3.5 Verificação da Normalidade dos resíduos revistos referentes ao ponto 4 .....	105
Figura III.1.1 Combinação de $k$ e $h$ da carta $CUSUM$ , com $C_0 = 0$ e $T_0 = 0$ , para vários valores de $ARL_{Em\ Controlo}$ .....	107
Figura III.1.2 Combinação de $k$ e $h$ da carta $CUSUM$ , com $C_0 = 0$ e $T_0 = 0$ , para vários valores de $ARL_{Em\ Controlo}$ .....	108
Figura III.1.3 Combinação de $k$ e $h$ da carta $CUSUM$ , com $C_0 = 0$ e $T_0 = 0$ , para vários valores de $ARL_{Em\ Controlo}$ .....	109
Figura III.2.1 Valor de $\lambda$ , da carta $EWMA$ , para vários valores de $ARL_{Em\ Controlo}$ .....	110
Figura III.2.2 Valor de $\lambda$ , da carta $EWMA$ , para vários valores de $ARL_{Em\ Controlo}$ .....	110
Figura III.2.3 Valor de $\lambda$ e $K$ , da carta $EWMA$ , em função de $ARL_{Em\ Controlo}$ .....	111
Figura III.2.4 Valor de $\lambda$ e $K$ , da carta $EWMA$ , em função de $ARL_{Em\ Controlo}$ .....	111
Figura IV.1.1.1 Carta $CUSUM$ Modificada (ponto 2) para a 1ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	113
Figura IV.1.1.2 Carta $CUSUM$ Modificada (ponto 2) para a 2ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	113
Figura IV.1.1.3 Carta $CUSUM$ Modificada (ponto 2) para a 3ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	114
Figura IV.1.1.4 Carta $CUSUM$ Modificada (ponto 2) para a 4ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	114
Figura IV.1.1.5 Carta $CUSUM$ Modificada (ponto 2) para a 4ª perturbação com $\Delta = 1\sigma_\varepsilon$ .....	114
Figura IV.1.1.6 Carta $CUSUM$ Modificada (ponto 2) para a 4ª perturbação com $\Delta = 1,5\sigma_\varepsilon$ .....	115
Figura IV.1.2.1 Carta $EWMA$ modificada (ponto 2) para a 1ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	115
Figura IV.1.2.2 Carta $EWMA$ modificada (ponto 2) para a 2ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	116
Figura IV.1.2.3 Carta $EWMA$ modificada (ponto 2) para a 3ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	116
Figura IV.1.2.4 Carta $EWMA$ modificada (ponto 2) para a 4ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	116
Figura IV.1.2.5 Carta $EWMA$ modificada (ponto 2) para a 4ª perturbação com $\Delta = 1\sigma_\varepsilon$ .....	117
Figura IV.1.2.6 Carta $EWMA$ modificada (ponto 2) para a 4ª perturbação com $\Delta = 1,5\sigma_\varepsilon$ .....	117

Figura IV.2.1.1 Carta <i>CUSUM</i> Modificada (ponto 3) para a 1ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	118
Figura IV.2.1.2 Carta <i>CUSUM</i> Modificada (ponto 3) para a 2ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	118
Figura IV.2.1.3 Carta <i>CUSUM</i> Modificada (ponto 3) para a 3ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	119
Figura IV.2.1.4 Carta <i>CUSUM</i> Modificada (ponto 3) para a 4ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	119
Figura IV.2.1.5 Carta <i>CUSUM</i> modificada (ponto 3) para a 4ª perturbação com $\Delta = 1\sigma_\varepsilon$ .....	119
Figura IV.2.1.6 Carta <i>CUSUM</i> Modificada (ponto 3) para a 4ª perturbação com $\Delta = 1,5\sigma_\varepsilon$ .....	120
Figura IV.2.2.1 Carta <i>EWMA</i> Modificada (ponto 3) para a 1ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	120
Figura IV.2.2.2 Carta <i>EWMA</i> Modificada (ponto 3) para a 2ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	121
Figura IV.2.2.3 Carta <i>EWMA</i> Modificada (ponto 3) para a 3ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	121
Figura IV.2.2.4 Carta <i>EWMA</i> Modificada (ponto 3) para a 4ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	121
Figura IV.2.2.5 Carta <i>EWMA</i> Modificada (ponto 3) para a 4ª perturbação com $\Delta = 1\sigma_\varepsilon$ .....	122
Figura IV.2.2.6 Carta <i>EWMA</i> Modificada (ponto 3) para a 4ª perturbação com $\Delta = 1,5\sigma_\varepsilon$ .....	122
Figura IV.3.1.1 Carta <i>CUSUM</i> Modificada (ponto 4) para a 1ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	123
Figura IV.3.1.2 Carta <i>CUSUM</i> Modificada (ponto 4) para a 2ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	123
Figura IV.3.1.3 Carta <i>CUSUM</i> Modificada (ponto 4) para a 3ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	124
Figura IV.3.1.4 Carta <i>CUSUM</i> Modificada (ponto 4) para a 4ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	124
Figura IV.3.1.5 Carta <i>CUSUM</i> Modificada (ponto 4) para a 4ª perturbação com $\Delta = 1\sigma_\varepsilon$ .....	124
Figura IV.3.1.6 Carta <i>CUSUM</i> Modificada (ponto 4) para a 4ª perturbação com $\Delta = 1,5\sigma_\varepsilon$ .....	125
Figura IV.3.2.1 Carta <i>EWMA</i> Modificada (ponto 4) para a 1ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	125
Figura IV.3.2.2 Carta <i>EWMA</i> Modificada (ponto 4) para a 2ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	126
Figura IV.3.2.3 Carta <i>EWMA</i> Modificada (ponto 4) para a 3ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	126
Figura IV.3.2.4 Carta <i>EWMA</i> Modificada (ponto 4) para a 4ª perturbação com $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .....	126

Figura IV.3.2.5 Carta *EWMA* Modificada (ponto 4) para a 4ª perturbação com  $\Delta = 1\sigma_\varepsilon$  ..... 127

Figura IV.3.2.6 Carta *EWMA* Modificada (ponto 4) para a 4ª perturbação com  $\Delta = 1,5\sigma_\varepsilon$  ..... 127



**ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 4.1 Unidades de amplitude (vibração) .....	25
Tabela 4.2 Unidades de vibração para cada gama de velocidade de rotação da máquina .....	26
Tabela 5.1 Regras para detecção de causas especiais de variação.....	38
Tabela 5.2 Limites de controlo das cartas $\bar{X}$ e $R$ .....	41
Tabela 5.3 Limites de controlo das cartas $\bar{X}$ e $S$ .....	41
Tabela 5.4 Limites de controlo das cartas $\bar{X}$ e $S^2$ .....	42
Tabela 5.5 Limites de controlo das cartas $\bar{X}$ e $MR$ .....	42
Tabela 5.6 Estimação dos parâmetros do processo.....	43
Tabela 5.7 Características teóricas da $FAC$ e da $FACP$ para cada modelo.....	51
Tabela 5.8 Limites de controlo das cartas de Shewhart baseadas em resíduos (Fase 1 SPC).....	53
Tabela 6.1 Parâmetros do modelo ajustado ao ponto 1 .....	67
Tabela 6.2 Parâmetros do modelo ajustado ao ponto 1 revisto .....	71
Tabela 6.3 Resumo dos parâmetros dos modelos ajustados a cada ponto.....	72
Tabela 6.4 Estudo da Normalidade dos resíduos de cada ponto .....	73
Tabela 6.5 Parâmetros estimados para cada ponto .....	73
Tabela 6.6 Valores de $T_L$ para os diferentes pontos .....	74
Tabela 6.7 Valores de $\delta$ definidos para os diferentes $\Delta$ .....	75
Tabela 6.8 Limites das cartas $CUSUM$ Modificadas.....	75
Tabela 6.9 Valores de $\lambda$ e $K$ para as cartas $EWMA$ com $\delta$ e $ARL$ pré-estabelecidos .....	76

**ÍNDICE DE TABELAS DOS ANEXOS**

Tabela II.1.1 Parâmetros do modelo ajustado ao ponto 2 .....	97
Tabela II.2.1 Parâmetros do modelo ajustado ao ponto 3 .....	100
Tabela II.2.2 Parâmetros do modelo ajustado ao ponto 3 revisto .....	101
Tabela II.3 - 1 Parâmetros do modelo ajustado ao ponto 4 .....	103
Tabela II.3 - 2 Parâmetros do modelo ajustado ao ponto 4 revisto .....	104



## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Amplitude da vibração
$A_2, A_3$	Factores para construção das cartas de controlo de variáveis
$\tilde{A}_2$	Factor para construção das cartas de controlo de variáveis
$AA$	Arsenal do Alfeite
$AR(p)$	Modelo auto-regressivo de ordem $p$
$ARIMA(p, d, q)$	Modelo misto, auto-regressivo e de médias móveis
$ARL$	"Average Run Length"
$ARL_{Em\ Controlo}$	$ARL$ quando o processo está sob controlo estatístico
$ARL_{Fora\ de\ Controlo}$	$ARL$ quando o processo não está sob controlo estatístico
$B$	Operador de desfasamentos
$B_3, B_4$	Factores para a construção das cartas de controlo de variáveis
$c_4$	Factor para a construção das cartas de controlo de variáveis
$CPM$	Ciclos por minuto
$Cov(X_t, X_{t-1})$	Covariância das observações desfasadas de $k$ instantes
$CUSUM$	Carta das Somas Acumuladas
$D_2, D_3, D_4$	Factores para a construção das cartas de controlo de variáveis
$d$	Ordem de diferenciação de um modelo $ARIMA$ ; Estatística de teste de Kolmogorov-Smirnov
$d_2, d_3$	Factores para a construção das cartas de controlo de variáveis
$D_{critico}$	Valor crítico para o teste Kolmogorov-Smirnov
$DA$	Direcção de Abastecimento

## Lista de Símbolos

$DN$	Direcção de Navios
$e_t$	Resíduo para o instante $t$
$EWMA$	Carta da Média Móvel Exponencialmente Amortecida
$E(X)$	Valor esperado da característica da qualidade $X$
$f$	Frequência
$FAC, FACP$	Função de Auto-Correlação, Função de Auto-Correlação Parcial
$FACE, FACPE$	Função de Auto-Correlação Estimada, Função de Auto-Correlação Parcial
$h$	Limite da carta $CUSUM$
$Hz$	Unidades SI de frequência (Hertz)
$ISO$	“International Organization for Standardization”
$lagk$	Auto-correlação de desfasamento $k$
$K$	Valor de referência
$LC$	Limite central
$LIC$	Limite inferior de controlo
$LSC$	Limite superior de controlo
$MA(q)$	Modelo de médias móveis de ordem $q$
$MCEWMA$	“Moving Centre-line EWMA”
$MR$	Amplitude móvel
$\overline{MR}$	Média das amplitudes móveis
$m$	Número de amostras
$N$	Número de dados
$N \sim N(\mu, \sigma^2)$	Distribuição Normal com média $\mu$ e variância $\sigma^2$
$n$	Dimensão da amostra



$np$	Número de unidades não conformes
$p$	Proporção de unidades não conformes
$R$	Amplitude amostral
$\overline{R}$	Média das amplitudes de amostras
$RMS$	Valor eficaz
$r_k$	Valor estimado de $\rho_k$
$RPM$	Rotações por minuto
$S$	Desvio padrão amostral
$S^2$	Variância amostral
$\overline{S^2}$	Média das variâncias de amostras
$SPC$	Controlo Estatístico do Processo
TAN	Número Total de Ácido
TAB	Número Total de Base
$T_L$	Valor a partir do qual se considera a intervenção da manutenção
$(T_L)_N$	Valor de vibração (normalizado)
$Var(\phi_{kk})$	Variância de $\phi_{kk}$
$Var(r_k)$	Variância de $r_k$
$Var(X)$	Variância da característica da qualidade X
$\hat{v}$	Valor estimado de $Var(r_k)$
$X$	Característica da qualidade
$\overline{X}$	Média amostral
$\overline{\overline{X}}$	Média das medianas

## Lista de Símbolos

$\alpha$	Nível de significância; Risco tipo I (Risco do produtor)
$\beta$	Risco tipo I (Risco do consumidor)
$\chi^2$	Estatística do Qui-Quadrado
$\varepsilon_t$	Ruído branco $(\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2))$
$\phi_p(B)$	Polinómio auto-regressivo de ordem $p$
$\phi_j$	Parâmetro de ordem $j$ no modelo $AR$ ou $ARMA$
$\phi_{kk}$	Coeficiente de auto-correlação parcial de ordem $k$
$\gamma_k$	Auto-covariância de desfasamento $k$
$\lambda$	Constante de amortecimento
$\mu$	Média do processo
$\hat{\mu}$	Média do processo estimada
$\theta_j$	Parâmetro de ordem $j$ do modelo $MA$ ou $ARMA$
$\Theta_q(B)$	Polinómio de médias móveis de ordem $q$
$\rho_k$	Coeficiente de correlação de desfasamento $k$ (“lag $k$ ”)
$\sigma$	Desvio padrão do processo
$\hat{\sigma}$	Desvio padrão do processo estimado
$\sigma_\varepsilon$	Desvio padrão dos resíduos
$\sigma_\varepsilon^2$	Variância dos resíduos
$\sigma_\omega$	Desvio padrão da carta de controlo
$\omega$	Estatística de uma carta de controlo
$\xi$	Parâmetro para a determinação da média do processo de um modelo $AR(p)$

$\Delta$	Alteração a detectar
$\nabla$	Operador de diferenças
$Z_t$	Variável Normal reduzida referente a $e_t$



# Parte I

## Capítulo 1 - Introdução

- 1.1 Enquadramento do tema
- 1.2 Âmbito
- 1.3 Objectivos
- 1.4 Metodologias
- 1.5 Estrutura da dissertação

### 1.1 Enquadramento do Tema

A actual situação económica tem incutido nas empresas a necessidade de criar meios de redução de custos, visto esta ser, muitas vezes, a única forma de fazerem face à concorrência e conseguirem manter-se vivas no mercado.

O mundo alterou-se bastante nos últimos anos, a competitividade e as mudanças constantes são uma realidade evidente e fala-se hoje em custos como nunca se falou antes, no entanto, a busca incessante do lucro, focada numa análise simplista de redução de custos e aumento de produção, pode desviar a empresa do seu real caminho, que é a sobrevivência no mercado.

A via para manter e ganhar novos mercados está sem dúvida na qualidade e na produtividade, sendo que a busca pelos mesmos passa por uma série de questões, como as políticas de gestão da qualidade, a análise do melhor sistema de produção, a manutenção da produção bem como outros factores estratégicos.

Tradicionalmente, manutenção e qualidade têm sido analisadas separadamente, contudo estes conceitos estão intrinsecamente ligados, uma vez que a deterioração das condições óptimas de funcionamento do equipamento leva a desvios no processo e a redução da qualidade.

A busca pela qualidade do processo e do produto passa pela qualidade da manutenção, sem a qual o montante investido em sistemas de gestão da qualidade pode ser inteiramente perdido.

A Manutenção Industrial representa, por tudo isto, uma preocupação crescente das empresas, e o objectivo de aumentar a fiabilidade dos equipamentos torna-se de crucial importância. É fundamental que a manutenção assuma um papel de permanente intervenção quer na conservação dos equipamentos existentes, quer na aquisição de novos equipamentos.

A utilização de ferramentas geralmente associadas à área da qualidade (como é o controlo estatístico do processo) na área da manutenção parece neste contexto bastante pertinente e com enorme potencial, sendo esta uma ferramenta poderosa, uma vez que estas áreas são tão complementares.

São escassas as publicações nesta área que utilizem este género de metodologia, no entanto a sua validação prática, trará sem dúvida grandes benefícios à monitorização da condição de equipamentos.

### 1.2 Âmbito

O presente estudo desenvolveu-se no âmbito da Manutenção Condicionada e do Controlo Estatístico do Processo (SPC). A abordagem prática a esta temática foi desenvolvida nas instalações da Escola Naval na Base do Alfeite da Marinha Portuguesa.

Um dos mais importantes indicadores de desempenho das marinhas modernas é a disponibilidade operacional dos seus navios, isto é, a percentagem de tempo do seu ciclo de vida em que estão disponíveis para realizar missões operacionais.

É possível verificar a extrema importância que a área da manutenção assume dentro desta instituição, e por isso, existem vários órgãos da Marinha que desenvolvem e participam em projectos de investigação científica, nomeadamente a Escola Naval, numa tentativa de melhorar as acções e estratégias de manutenção utilizadas pelos responsáveis desta área.

A análise de vibrações, como técnica de monitorização da condição de equipamentos, tem sido uma abordagem que se pretende implementar na estratégia de manutenção de alguns componentes dos navios, no entanto até agora esta tentativa não tem sido bem-sucedida.

Alguns organismos responsáveis pela manutenção dos navios, têm procedido à recolha de dados vibratórios, no entanto não o têm feito de forma consistente ao longo do tempo, e a análise dos mesmos é muitas vezes “deixada para depois”.

O presente estudo pretende mostrar o potencial da utilização das cartas de controlo como técnica de monitorização da condição, e apesar de ter sido desenvolvido na Escola Naval, esta metodologia pode ser aplicada a qualquer tipo de equipamento industrial.

### 1.3 Objectivos

O trabalho tem como objectivo finalizar o grau académico a que me proponho, aplicando os conhecimentos adquiridos, procurando aprofundá-los fundamentalmente na área da manutenção e na área do controlo estatístico do processo.

O objectivo principal deste trabalho centra-se na pesquisa e desenvolvimento de metodologias que permitam aplicar o controlo estatístico à monitorização da condição de um equipamento, facilitando a detecção antecipada de prováveis avarias. A detecção de tendências que traduzam a degradação do equipamento é outro ponto fulcral, que permite o conhecimento do real estado do mesmo, identificando a sua degradação progressiva no tempo.

Pretende-se também responder aos requisitos de um trabalho de investigação, através da aplicação de metodologias de análise estatística como é o caso das cartas de controlo. São ainda alvo de pesquisa, os pressupostos para a aplicação do controlo estatístico como a independência dos dados e a sua Normalidade.

Uma vez que o trabalho foi desenvolvido numa organização, pretende-se ir de encontro às necessidades identificadas, desenvolvendo este trabalho com o intuito de criar valor para a mesma.

### 1.4 Metodologia

A metodologia adoptada no desenvolvimento do presente estudo, pretende fazer a junção dos conceitos de manutenção condicionada com o controlo estatístico do processo.

Estabelecidos os objectivos, iniciou-se o estudo com a revisão da literatura relacionada com estes dois temas.

Os desenvolvimentos práticos incidiram sobre dados de vibração, retirados de um equipamento “de teste” (electrobomba), e dividem-se essencialmente em duas etapas.

Numa primeira etapa foram retirados dados com o equipamento em boas condições de funcionamento, e aplicada uma das ferramentas do controlo estatístico, as cartas de controlo. Foram estimados os parâmetros (média e desvio padrão) que caracterizam a vibração do sistema (foram utilizadas as cartas de Shewhart dos resíduos devido à auto-correlação dos dados).

Numa segunda etapa foi introduzida uma avaria no equipamento (desaperto), com diferentes índices de gravidade (quatro perturbações), e mais uma vez aplicaram-se cartas de controlo (desta vez as cartas *CUSUM* e *EWMA* Modificadas) para monitorizar o estado do equipamento. Verificou-se a sensibilidade das mesmas na detecção de pequenas e moderadas alterações do valor médio da vibração do sistema.

A ausência de dados credíveis e consistentes relativos às vibrações de equipamentos que estivessem em frequente funcionamento (por exemplo nos navios da Marinha), e devido à falta de tempo para os conseguir de forma a que se detectasse uma degradação progressiva dos mesmos, levou a que se optasse por retirar dados em “laboratório” e introduzir manualmente as avarias no equipamento, na expectativa de demonstrar que a metodologia proposta é credível e possível de ser aplicada.

As análises estatísticas não seriam possíveis sem o auxílio das aplicações informáticas *Excel* e do *software Statistica*.

### 1.5 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos, inseridos em três partes distintas. Esta organização tem por objectivo proporcionar ao leitor uma consulta isolada da informação, bem como facilitar a compreensão dos conceitos e sua aplicação no caso em estudo.

A **Parte I** é constituída por cinco capítulos, onde são apresentadas as bases dos conceitos teóricos inerentes às metodologias aplicadas.

No *Capítulo 1 – Introdução*, apresenta de forma genérica o trabalho desenvolvido na dissertação, os objectivos que se pretendem concretizar bem como a metodologia aplicada e ainda a descrição da organização do documento.

No *Capítulo 2 – Manutenção Industrial*, é apresentada uma descrição dos principais conceitos relacionados com a Manutenção Industrial, bem como a sua evolução ao longo do tempo. São ainda apresentadas as principais filosofias de manutenção bem como as razões que levam a optar por cada uma delas.

No *Capítulo 3 – Monitorização da condição*, é feita uma abordagem mais detalhada deste tipo de estratégia de manutenção, uma vez que é aquela que se pretende aplicar no caso de estudo. Aqui são apresentadas as noções fundamentais desta temática bem como algumas das vantagens e desvantagens da sua utilização.

O *Capítulo 4 – Análise de vibrações*, contempla uma sucinta apresentação das noções básicas de vibrações bem como algumas técnicas utilizadas para a sua análise. São ainda apresentados alguns dos equipamentos de medida utilizados na aquisição de dados desta natureza.

Por fim no *Capítulo 5 – SPC aplicado à manutenção*, é exposta a pesquisa bibliográfica que suporta teoricamente as técnicas aplicadas no desenvolvimento prático.

A **Parte II** é composta pelo Capítulo 6, o qual se relaciona de forma mais directa com os desenvolvimentos práticos do estudo.



No *Capítulo 6 – Caso de estudo*, é apresentado o equipamento que permitiu a recolha de dados para o estudo do problema, bem como uma descrição das várias considerações que foram feitas. São ainda apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos a nível da aplicação do SPC e a sua respectiva extrapolação para a área da manutenção condicionada.

Para finalizar, apresenta-se a **Parte III**, constituída pelo *Capítulo 7 – Conclusões e trabalhos futuros*. Aqui apresentam-se as conclusões gerais da dissertação e propõem-se trabalhos futuros nestas áreas de aplicação.



## Capítulo 2 - A Manutenção Industrial

- 2.1 Introdução
- 2.2 Manutenção industrial
- 2.3 Evolução do conceito de manutenção
- 2.4 Estratégias de manutenção

### 2.1 Introdução

O presente capítulo é iniciado com um breve enquadramento do conceito de manutenção industrial, seguindo-se uma descrição da sua evolução ao longo dos anos.

Nos subcapítulos seguintes são apresentados conceitos no cômputo geral da indústria, essenciais para a compreensão do trabalho apresentado.

### 2.2 Manutenção industrial

A Norma Portuguesa de terminologia para manutenção, define o conceito de manutenção como sendo o resultado da “combinação de todas as acções técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida” (NP EN 13306:2007).

O crescente desenvolvimento da sociedade, a globalização e o contexto de competitividade nos mercados actuais, leva a que qualquer empresa industrial esteja constantemente a ser colocada à prova. A entrega ao cliente do produto ou serviço que se pretende, bem à primeira, com qualidade e a preços concorrenciais há muito deixou de ser um factor de diferenciação para ser uma questão de sobrevivência (Simões *et al.*, 2011).

A qualidade e eficiência bem como a disponibilidade das máquinas/equipamentos produtivos têm neste contexto um papel fulcral na competitividade da empresa (Mobley, 2004).

Nas organizações, os custos de manutenção representam uma fatia considerável dos custos operacionais totais. Custos relacionados com atrasos, produtos fora de especificação, operações de manutenção (horas extras e reparação de componentes) bem como todos os custos intangíveis a si

associados, são os principais factores que contribuem para despesas anormais na área da manutenção. Esta área é por tudo isto, uma área de grandes oportunidades de melhoria e consequentemente de redução de custos para a organização a curto prazo (Mobley, 2004).

É ainda muito frequente, actualmente, que o impacto das operações de manutenção na qualidade do produto, nos custos de produção e consequentemente nos lucros, seja ignorado por parte das organizações. Esta situação deve-se em muito, à falta de dados concretos que quantifiquem a real necessidade de reparação ou manutenção das máquinas, equipamentos, instalações ou sistemas. Para além disso, ainda reside em larga escala, a “crença” de que a manutenção “é um mal necessário” ou que “nada pode ser feito para melhorar os custos de manutenção”. A verdade é que há décadas atrás, estas afirmações talvez fizessem sentido, mas não nos dias que correm, uma vez que os avanços tecnológicos que têm surgido a um ritmo cada vez maior, possibilitam a monitorização da condição de funcionamento de sistemas, equipamentos e máquinas fornecendo meios de controlo da operação de manutenção (Mobley, 2004).

Desta forma, a manutenção, realizada com recurso a meios internos à organização ou através de serviço prestado por fornecedores externos especializados, mostra-se fulcral no sucesso das organizações, uma vez que possibilita que os equipamentos de produção estejam aptos para desempenhar as suas funções ao nível que lhes é exigido (NP 4483:2008).

### 2.3 Evolução do conceito de manutenção

A história da manutenção está intimamente ligada ao desenvolvimento técnico-industrial da humanidade. Desde que surgiu, até aos dias que correm, o conceito de manutenção foi marcado por várias fases de desenvolvimento, estando o seu avanço relacionado com o progresso tecnológico que se verificou nas últimas década (Kardec e Nascif, 2009).

Numa primeira fase (até cerca de 1914), a manutenção industrial era encarada, dentro do processo produtivo, como secundária. As indústrias não possuíam responsáveis pela manutenção, limitando-se a produzir o máximo possível nos seus equipamentos até que estes deixassem de funcionar (Kardec e Nascif, 2009).

A partir da 1ª Guerra Mundial, as organizações numa tentativa de conseguir assegurar uma produção mínima, passaram a fazer a manutenção correctiva dos seus equipamentos, isto é, quando estes avariavam eram reparados e voltavam ao processo produtivo (Kardec e Nascif, 2009).

Com a 2ª Guerra Mundial, um declínio significativo no que respeita à oferta de mão-de-obra e a necessidade de aumentar, em larga escala, a produção de bens de consumo, culminou numa maior mecanização da indústria e na percepção de que as paragem dos equipamentos eram economicamente negativas para as organizações. Por volta dos anos 1950, passa-se a acreditar que priorizando o bom funcionamento dos equipamentos era possível evitar falhas, o que originou um

novo conceito de Manutenção, que nos dias de hoje se designa por Manutenção Preventiva (Scheffer e Girdhar, 2004).

Nesta fase, as indústrias começaram a criar departamentos autónomos encarregues não apenas de corrigir as falhas, mas também, de evitar que estas acontecessem. O desenvolvimento da Indústria Aeronáutica, o surgimento da electrónica e o aparecimento do primeiro computador, contribuíram em larga escala para o avanço do conceito de manutenção (Kardec e Nascif, 2009).

A partir dos anos 1970, o começo da globalização da economia traduziu-se em grandes desafios de produtividade, o que fez incidir o foco também na manutenção. Cresceram as expectativas em relação às funções e aos resultados da manutenção, às novas interpretações dos processos de falhas de equipamentos e às novas técnicas de análise e implementação da manutenção (Scheffer e Girdhar, 2004).

Verifica-se que apenas em quarenta anos, o conceito de manutenção sofreu alterações visíveis, passando de um estado quase de inexistência para uma das maiores prioridades de algumas organizações (Cabral, 2009).

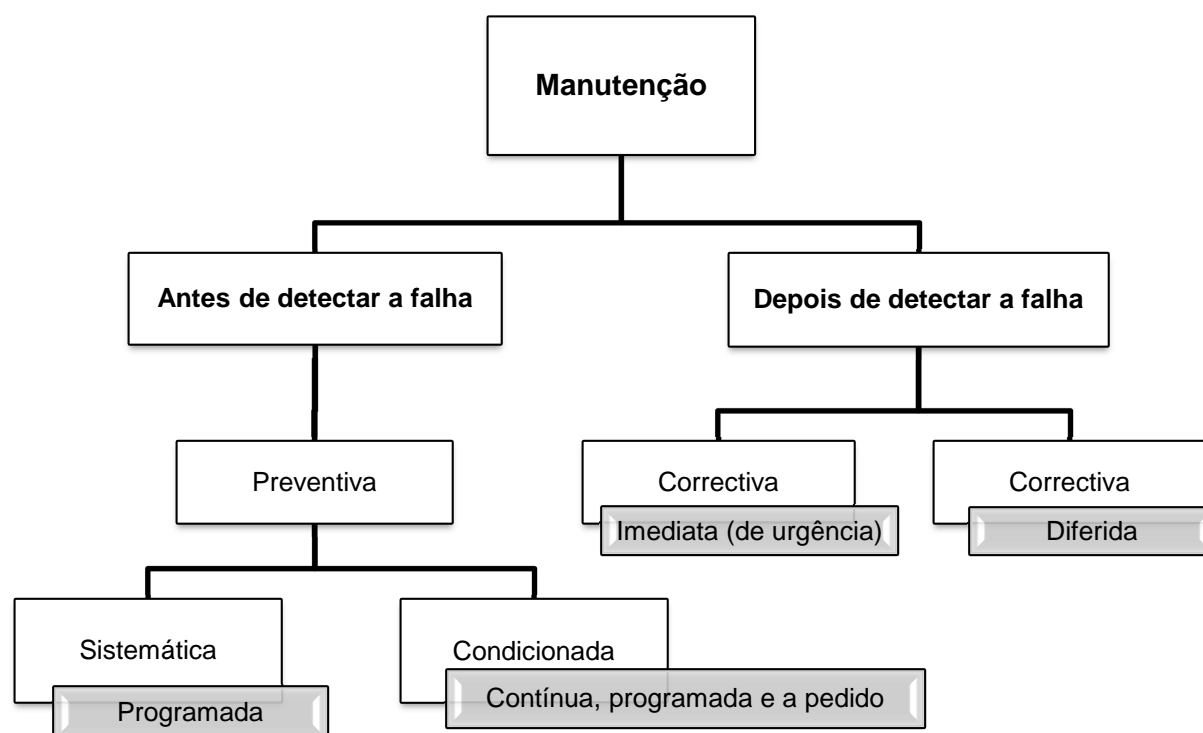
## **2.4 Estratégias de Manutenção**

A origem das avarias nos equipamentos está relacionada com inúmeros factores, que podem passar pelas opções do projectista, pela forma como é feita a sua instalação, pelas práticas, inadequadas, de manutenção, condições de operação e também pela natural deterioração dos equipamentos. Todos estes factores contribuem de forma relevante para o tempo de vida da respectiva máquina.

Obviamente, nem todos estes factores estão sob o controlo das organizações que possuem os equipamentos, mas o conhecimento de potenciais problemas ajudará a apontar soluções de melhoria a implementar no futuro.

Após a introdução do conceito de manutenção industrial e a sua relevância no que respeita ao processo produtivo das organizações, torna-se fundamental apresentar agora uma abordagem das diferentes estratégias de manutenção utilizadas na indústria.

De salientar que a abordagem a estas diferentes estratégias de manutenção poderá ser ligeiramente diferente dependendo do autor consultado, no entanto, visto existir uma Norma na qual estes conceitos são apresentados, é esta abordagem que será seguida.



**Figura 2.1 Estratégias de manutenção (Adaptado de: NP EN 13306, 2007)**

Como se pode verificar no esquema da Figura 2-1, as estratégias de manutenção são essencialmente duas, Preventiva e Correctiva, sendo que a primeira é uma estratégia aplicada antes da detecção da falha, ao passo que, a segunda é posterior. Dentro da manutenção preventiva pode ainda distinguir-se a manutenção Sistemática e a manutenção Condicionada.

#### **2.4.1 Manutenção Correctiva**

A manutenção correctiva é efectuada posteriormente à detecção da avaria, com o objectivo de restabelecer as condições de um equipamento para que este seja capaz de cumprir a sua missão.

A manutenção correctiva pode ser efectuada imediatamente após a detecção da falha (de urgência) de forma a evitar consequências inaceitáveis, ou algum tempo depois dessa detecção (diferida).

Na primeira situação, a filosofia adoptada é a de deixar as máquinas funcionar até ocorrer uma avaria, isto é, a manutenção não é programada (Assis, 2004).

Esta política é essencialmente descrita por (Mobius Institute, 2005, p. 4):

***“ Deixar funcionar até partir...”***

A segunda situação acontece quando a anomalia se revela no equipamento gradualmente (por exemplo através de um aumento crescente do ruído). A manutenção pode intervir de forma

programada num momento mais conveniente, continuando, no entanto a tratar-se de uma política de manutenção correctiva (Assis, 2004).

A manutenção correctiva, como qualquer outro tipo de manutenção, apresenta algumas vantagens, tais como, o facto de não envolver custos relativos à monitorização da condição e não levar a sobremanutenção das máquinas (Mobius Institute, 2005, pp. 5-6).

Como desvantagens desta filosofia de manutenção apresentam-se, entre outras, o facto de os equipamentos funcionarem sem controlo, o que resulta, muitas vezes, em avarias catastróficas (originando custos de reparação avultados) e a necessidade de grandes níveis de *stock* de peças de reposição (Scheffer e Girdhar, 2004).

#### 2.4.2 Manutenção Preventiva

Este tipo de estratégia é extremamente importante na actividade de manutenção, representando, dentro de uma organização, uma parte importante do esforço de manutenção total (Mobley, 2004).

A manutenção preventiva assenta sobretudo na filosofia (Mobius Institute, 2005, p. 6):

***“ Reparar antes de partir...”***

Segundo NP EN 13306:2007 a manutenção preventiva, é efectuada a intervalos de tempo pré-determinados, ou de acordo com critérios que têm por finalidade a redução da probabilidade de avaria ou degradação do equipamento. Esta filosofia pode ainda ser dividida em Manutenção Sistemática ou Manutenção Condicionada.

##### ➤ Manutenção Preventiva Sistemática

Uma vez que o tempo de vida útil de um equipamento é limitado e a probabilidade de avaria aumenta consideravelmente à medida que este envelhece, é necessário intervir antes que as avarias ocorram. O grande desafio deste tipo de estratégia é estimar o tempo de vida útil do equipamento e estipular os tempos entre revisões, tendo sempre em conta o equilíbrio entre o risco e os custos (Mobius Institute, 2005).

A manutenção preventiva sistemática é efectuada em intervalos de tempo previamente determinados. Normalmente esses intervalos de tempo são estipulados por forma a garantir que, a percentagem de equipamentos que avariaram durante esse período não ultrapassa 1-2%. (Randall, 2011)

As intervenções são efectuadas periodicamente ou quando um componente atinge um determinado limite de idade. Com base no conhecimento de degradação do equipamento e do seu risco de falha, estabelece-se o intervalo de tempo entre o qual o equipamento deve ser objecto de uma nova intervenção (Assis, 2004).

As principais vantagens desta política de manutenção prendem-se com o facto de a manutenção ser efectuada de forma programada e controlada, o que consequentemente leva a uma redução das avarias não previstas dos equipamentos, o que por sua vez leva a uma redução das perdas de produção (associadas a falhas catastróficas dos equipamentos). Traduz-se ainda numa carga de trabalho mais equilibrada, uma maior consistência na qualidade, bem como uma maior rentabilidade no controlo do armazenamento e dos custos ligados aos sobressalentes (Dhillon, 2002).

O facto de as máquinas serem frequentemente “reparadas” sem necessidade (resultando muitas vezes, noutro tipo de avarias), a utilização de um número de peças mais elevado, o aumento dos custos resultantes do aumento das acções de manutenção e o facto de a manutenção aplicada ser semelhante para os vários equipamentos (sem levar em conta as características individuais de cada um) são as suas principais desvantagens (Dhillon, 2002).

### ➤ **Manutenção Preventiva Condicionada**

Quando se fala de manutenção preventiva condicionada (muitas vezes também chamada de manutenção preditiva), fala-se de uma estratégia que consiste na monitorização do funcionamento dos equipamentos, através do controlo de parâmetros que reflectem a degradação dos mesmos, e na posterior intervenção por parte da manutenção sobre estes (Saranga, 2002).

Por outras palavras, esta política permite aumentar a fiabilidade e disponibilidade dos equipamentos através da detecção prévia das avarias iminentes, recorrendo a técnicas de monitorização, que podem ser aplicadas de forma continua ou discreta. O sucesso deste tipo de manutenção depende ainda da eficácia dos recursos utilizados na monitorização dos equipamentos (Randall, 2011).

Este método apresenta vantagens das quais se podem realçar (Mobius Institute, 2005):

- Redução das perdas de produção não programadas;
- Redução de custos de manutenção e de alguns outros factores indirectos dos custos de produção;
- Melhorias na gestão de componentes das máquinas (são encomendados e utilizados apenas quando necessário);
- Eliminação de revisões desnecessárias;
- Aumento da qualidade de produção.

Em relação aos outros tipos de manutenção, esta apresenta também algumas desvantagens (Scheffer e Girdhar, 2004):

- Custo dos equipamentos, sistemas, serviços e pessoal (normalmente bastante elevados);
- Não garante o aumento do tempo de vida útil do equipamento;



- Aumento do trabalho e dos custos de manutenção caso exista uma avaliação errada da deterioração do equipamento.

A principal diferença entre as duas estratégias de manutenção preventiva abordadas anteriormente, baseia-se no facto de, enquanto a sistemática é mesmo programada, a condicionada é posta em acção apenas quando o alarme surge. Isto permite uma maior utilização de todos os equipamentos e também evita intervenções inúteis realizadas pela sistemática (Randall, 2011).

No capítulo seguinte, será apresentada uma abordagem aprofundada da monitorização da condição dos equipamentos.

### **2.4.3 Manutenção por oportunidade**

Esta é uma outra estratégia de manutenção que consiste na reparação de componentes dos equipamentos, que se encontram normalmente escondidos, e que são expostas quando se realiza a manutenção correctiva ou manutenção preventiva (Saranga, 2002).

Este método permite substituir os elementos que apresentam maior desgaste evitando problemas num futuro próximo.

É no entanto, necessário ter a consciência de que, apesar de existirem todas estas políticas e estratégias de manutenção, capazes de prevenir as falhas na maioria das situações, existem falhas graves, impossíveis de prever ou controlar, que resultam muitas vezes em grandes catástrofes ambientais (Saranga, 2002).



## Capítulo 3 - Monitorização da Condição

- 3.1 Introdução
- 3.2 Conceitos fundamentais
- 3.3 Monitorização da condição
- 3.4 Técnicas de monitorização da condição
- 3.5 O futuro da monitorização da condição

### 3.1 Introdução

A monitorização da condição é uma técnica que surgiu nos anos 1970 e tem assumido cada vez maior importância na área da manutenção, devido aos bons resultados obtidos com a sua aplicação.

Neste capítulo é feita uma abordagem a alguns conceitos fundamentais da área da manutenção, com mais detalhe para a monitorização da condição.

São ainda apresentadas as principais técnicas de monitorização e as suas aplicações.

### 3.2 Conceitos fundamentais

Qualquer política de manutenção deve ser definida de acordo com três critérios fundamentais (NP EN 13306:2007):

- Assegurar a disponibilidade do bem, para a função requerida a custos óptimos;
- Melhorar a durabilidade do bem e/ou qualidade do produto ou do serviço fornecido tendo em conta os custos;
- Considerar os requisitos de segurança relativos não apenas ao bem mas também ao pessoal (de manutenção ou de operação), e quando necessário, levar em consideração os impactos ambientais.

A manutenção revela-se essencial à segurança e ao funcionamento de um bem, pelo que a interpretação dos conceitos fundamentais, que a ela estão associados, é fulcral.

A Norma 13306:2007 fornece um conjunto de definições que permitem um melhor entendimento e contextualização desses conceitos.

A **disponibilidade** pode definir-se como “a probabilidade de um elemento, segundo condições de fiabilidade e manutibilidade definidas, realizar uma determinada função num instante de tempo, ou num período definido”.

$$A(t) = P(\text{Elemento estar a funcionar no período } t) \quad (3.1)$$

Daqui surge a importância de definir também o conceito de fiabilidade e manutibilidade.

A **fiabilidade** pode ser definida como “a probabilidade de um elemento desempenhar uma função especificada, segundo dadas condições ambientais e operacionais, durante um período de tempo estabelecido”, ou simplesmente, “a aptidão de um sistema não avariar durante a utilização”.

A **manutibilidade** é “a probabilidade de um elemento, segundo condições estabelecidas de utilização, ser reparado de forma a poder realizar as funções desejadas quando a manutenção é efectuada de acordo com processos e fontes descritas”.

Já a **durabilidade** é definida como a “aptidão de um bem para cumprir uma função requerida, de acordo com condições de utilização e manutenção especificadas, até que seja atingido um estado limite”, sendo que este estado limite pode ser caracterizado pelo fim de vida útil, pela sua inadequação, por razões técnicas ou económicas, ou por outros factores relevantes.

### 3.3 Monitorização da condição

A monitorização da condição é aplicada basicamente a equipamentos cuja condição dos seus componentes se deteriora ao longo do tempo (Al-Najjar, 1992). No entanto para a aplicação desta política de manutenção há que levar em conta alguns aspectos, uma vez que esta não é viável em todos os equipamentos.

É necessário começar por fazer uma análise de criticidade aos equipamentos, que normalmente os classifica em equipamentos críticos, essenciais e de uso geral. Os equipamentos de uso geral são aqueles cuja falha não afecta a segurança nem a produtividade do processo. Já os equipamentos essenciais são aqueles cuja falha pode restringir uma parte ou até mesmo todo o processo. São equipamentos que exigem moderadas despesas e tempos de reparação. Os equipamentos críticos são aqueles cuja falha pode afectar, com grande impacto, a segurança e a rentabilidade do processo. Geralmente são equipamentos cuja reparação é muito dispendiosa e demorada (Scheffer e Girdhar, 2004). É sobretudo nos equipamentos críticos (embora por vezes também se aplique a equipamentos essenciais) que se aplica a manutenção condicionada.

Há ainda que levar em consideração, que não se justifica a implementação desta política quando os custos de monitorização se sobrepõem aos prejuízos decorrentes das avarias (se a segurança dos operadores não ficar em causa) (Scheffer e Girdhar, 2004).

Depois de se optar por este tipo de estratégia, há outro aspecto importante a levar em conta, isto é, decidir se a monitorização será feita de forma contínua ou periódica.

Em situações em que o defeito se pode desenvolver num curto espaço de tempo, ou quando o equipamento é de extrema importância para o processo, adopta-se o monitoramento contínuo. Para os restantes equipamentos, cuja falha não tem grande impacto, no que respeita à continuidade operacional, adopta-se um plano de medições periódicas (Saranga, 2002).

O diagnóstico de avarias através da monitorização da condição dos equipamentos, em muito se assemelha ao diagnóstico médico feito a um ser humano. Sempre que o corpo apresenta um sintoma, o sistema nervoso fornece a informação (fase de detecção), são efectuados os exames necessários e de seguida é recomendado um tratamento. Acontece algo semelhante com as máquinas, visto que, sempre que o equipamento está com problemas, este exhibe, sob a forma de vários parâmetros (temperatura, vibrações,...), esse sintoma. As falhas dos equipamentos podem ou não ser facilmente detectadas pelo ser humano, e é aqui que entram as várias técnicas de monitorização (Scheffer e Girdhar, 2004).

No subcapítulo que se segue, apresentam-se as mais importantes técnicas de monitorização da condição.

### **3.4 Técnicas de monitorização da condição**

A monitorização da condição recorre a um conjunto de técnicas, que permitem avisos prévios da deterioração dos equipamentos. A medição de parâmetros, feita de forma contínua ou periódica, e a posterior comparação com valores de referência, permite uma avaliação global dessa deterioração, quer de uma parte ou de todo o equipamento (Carnero, 2003).

As técnicas de manutenção condicionada são normalmente ensaios não destrutivos, que se efectuam na maioria das vezes sem a necessidade de abrir ou parar os equipamentos, o que em termos de produtividade se revela uma mais-valia (Concu *et al.*, 2011).

Existem diversas técnicas utilizadas na monitorização da condição, das quais se podem destacar: análise de vibrações, tribologia, líquidos penetrantes, termografia, ultra-som, inspecção visual e análise dos parâmetros de rendimento. Apresenta-se de seguida uma abordagem sucinta destas técnicas.

#### **3.4.1 Inspeção visual**

Este é um método muitas vezes esquecido na lista das técnicas não destrutivas, no entanto esta técnica é bastante comum e muito poderosa. A inspecção visual consiste na detecção a “olho nu” de indícios de falha. As fugas e as fissuras são exemplos de avarias facilmente identificáveis através deste método (Agency, 2000).

Esta é uma técnica geralmente aplicada em simultâneo com outras técnicas, devido aos seus baixos custos. É, no entanto, fundamental que o operador seja especializado na área para que esteja apto a fazer uma avaliação correcta da situação (Mobley, Higgins e Wikoff, 2008).

### 3.4.2 Ultra-som

Este método baseia-se na emissão de sons de elevada frequência (muito acima do limite audível) na superfície que se pretende avaliar. O som provoca a vibração mecânica do material constituinte dos equipamentos, vibração que depende não só da frequência e amplitude da excitação provocada, mas também do material, da geometria e da massa desses componentes.

Se existirem vazios de material (por exemplo, quando existem fissuras, poros, etc.), os ecos recebidos são distorcidos, uma vez que a velocidade do som através do ar existente nesses vazios é menor. Neste método é necessária a existência de um bloco padrão (representativo da superfície a avaliar) para que se possa comparar a resposta obtida com aquela que se obtém através da superfície isenta de defeitos.

Outro aspecto fundamental no sucesso da implementação desta técnica é a preocupação em minimizar os efeitos decorrentes da interface que se estabelece entre a superfície da peça a avaliar e o equipamento de medição. A competência e experiência dos executantes e intérpretes são essenciais para a correcta avaliação da situação, nomeadamente no que toca à distinção entre anomalias inócuas e verdadeiros defeitos.

Este método é muito utilizado, não só na detecção de defeitos, mas também na medição da espessura de peças. Através desta técnica é possível obter informações bastante úteis e precisas acerca da dimensão dos defeitos mas também no que toca à profundidade a que estes se encontram.

### 3.4.3 Termografia

A termografia assenta no princípio de que qualquer material emite radiação acima do zero absoluto. Após colocar a máquina em funcionamento, a temperatura desta é visualizada pela energia infravermelha (calor) libertada. Proceda-se à leitura da quantidade de calor que esta irradia, e desta forma, detectam-se as zonas com problemas através da identificação das regiões ou pontos onde a temperatura está alterada em relação a um padrão pré-estabelecido (mais quentes ou mais frias) (Scheffer e Girdhar, 2004).

Hoje em dia, existem inúmeros equipamentos de medição, que permitem a detecção de pequenas variações de temperatura quando comparadas com as condições padrão (Randall, 2011).

### 3.4.4 Análise dos parâmetros de desempenho

Em determinados equipamentos, a análise de parâmetros de desempenho, é uma forma bastante eficaz de verificar se este está a funcionar correctamente (Randall, 2011).

Esta técnica baseia-se na recolha de dados relativos a parâmetros de funcionamento do equipamento (compressão, temperaturas, etc.) e no cálculo do rendimento actual do equipamento a partir desses parâmetros. O resultado é comparado com o rendimento original do equipamento, e desta forma verifica-se se existe alguma anomalia (Mobley, Higgins e Wikoff, 2008).

### 3.4.5 Líquidos penetrantes

Este método é muito utilizado na detecção de fissuras, principalmente em materiais não magnéticos como o alumínio, magnésio, aços, vidro e plásticos. A técnica consiste em fazer penetrar um líquido (denominado de penetrante) na fissura existente, o qual através do fenómeno de capilaridade penetra na descontinuidade. Seguidamente remove-se o excesso de penetrante da superfície (a remoção deve ser feita com líquidos de remoção apropriados) e posteriormente coloca-se o revelador (geralmente é um pó fino branco). O revelador absorve o penetrante das descontinuidades, revelando-as (Agency, 2000).

A avaliação dos resultados obtidos deve ser feita sob boas condições de luminosidade (se o penetrante for do tipo visível) ou sob luz negra (caso o penetrante seja fluorescente).

A última etapa passa pela limpeza de todos os resíduos de produto, uma vez que estes podem interferir em etapas posteriores de trabalho da peça.

Este método apresenta uma grande simplicidade, quer no que toca à execução quer na análise dos resultados (apesar de exigir grande rigor na execução do procedimento).

As principais desvantagens prendem-se com o facto de somente as descontinuidades superficiais serem detectadas e de não poder ser aplicado em superfícies porosas ou absorventes, já que não seria possível a total remoção do penetrante (Agency, 2000).

### 3.4.6 Tribologia

Esta é uma área que estuda o atrito, o desgaste e a lubrificação de superfícies sólidas em contacto, sejam elas fixas ou móveis. Existem várias técnicas de tribologia que podem ser utilizadas na monitorização da condição, nomeadamente a análise de óleos lubrificantes e análise de partículas de desgaste (Mobley, 2002).

### ➤ **Análise de óleos lubrificantes**

Análise de óleos lubrificantes, como o nome indica, é uma técnica de análise que determina a condição dos óleos lubrificantes usados em equipamentos mecânicos e eléctricos. Através desta técnica é possível identificar as condições do óleo, isto é, verificar se este mantém as suas propriedades físico-químicas (Tsang, 1995).

A análise às propriedades físico-químicas deve ser efectuada de forma periódica em intervalos de tempo pré-estabelecidos. Os principais parâmetros testados nas amostras são: viscosidade, contaminação (por exemplo por água ou líquidos refrigeradores), teor de sólidos, oxidação, ponto de inflamação, bem como o número total de ácido (TAN) ou base (TBN) existente no óleo (Mobley, Higgins e Wikoff, 2008).

### ➤ **Análise de partículas de desgaste**

Enquanto a análise das propriedades físico-químicas dos óleos lubrificantes verifica o estado desses mesmos óleos, a análise das partículas existentes nesses óleos, permite a verificação da condição da máquina. Em termos simples, o estado do equipamento é conhecido analisando a quantidade, composição e tamanho das partículas no óleo (Mobley, 2002).

Existem dois métodos de estudo das partículas de desgaste, a espectrometria e a ferrografia.

O primeiro método usa filtros graduados para separar os sólidos em tamanhos. Esta técnica apresenta algumas limitações nomeadamente o facto de só considerar partículas de 10 µm ou menos (contaminantes de tamanho superior são ignorados).

O segundo método, a ferrografia, separa as partículas de desgaste utilizando um íman. A limitação desta técnica prende-se com o facto de apenas considerar as partículas magnéticas.

A análise de partículas de desgaste é uma excelente ferramenta de detecção de falhas, no entanto como qualquer programa de manutenção condicionada, apresenta algumas limitações, que se prendem com o custo dos equipamentos de análise, a precisão das amostras recolhidas e a interpretação dos resultados obtidos (Mobley, 2002).

### **3.4.7 Análise de vibrações**

Esta é sem dúvida uma das técnicas com maior expressão no que toca à monitorização da condição de máquinas rotativas. Permite detectar, prematuramente, anomalias em rolamentos, desalinhamentos, desequilíbrios, folgas, ressonância, entre muitas outras.

O princípio da análise de vibrações baseia-se na ideia de que, mesmo a mais pequena anomalia num sistema dinâmico, causa variações na intensidade das vibrações desse sistema (Gonçalves *et al.*, 2007).



Este método consiste na recolha de dados de vibrações, medidos em vários pontos do equipamento (sem interromper o seu normal funcionamento) e na posterior comparação destes valores, com valores de referência (normalmente constam em normas ou nos manuais dos equipamentos) e que caracterizam o equipamento quando este está em boas condições.

A detecção de desvios (através dessa comparação de valores), isto é, verificação de variações em frequência ou em amplitude sugere a presença de anomalias.

As técnicas de análise de vibrações estão bem desenvolvidas e vão desde métodos mais simples (medição dos valores médios das amplitudes de vibração) até aos mais complexos (correlações e espectros de correlações). Uns permitem a detecção da anomalia, outros vão mais longe e permitem diagnosticar o componente responsável por essas falhas.

Para a aplicação deste método, são necessárias pessoas com formação, tanto na fase da recolha dos dados como na fase de análise dos mesmos.

Como todas as técnicas de monitorização da condição, esta também apresenta algumas limitações, como por exemplo, o facto de as medições poderem ser afectadas por outras fontes de vibração na máquina investigada, a dificuldade da interpretação dos sinais, bem como o facto de um aumento na sensibilidade do ensaio muitas vezes levar ao aumento de falsos alarmes.

### 3.5 O futuro da Monitorização da Condição

O futuro da monitorização da condição passa pela integração de tecnologias e sistemas, pelo aumento da utilização de sistemas de diagnóstico automatizados e pela integração da monitorização da condição e da monitorização de processos.

A maioria dos sistemas de monitorização disponíveis no mercado, já possibilita o manuseamento de dados provenientes de diversas tecnologias, por exemplo, permitem a comparação de curvas de tendência de contagem de partículas com a temperatura dos rolamentos bem como com os níveis de vibrações, tudo isto no mesmo gráfico.

A exigência, no que toca às capacidades dos técnicos e analistas, também se torna cada vez maior com o evoluir deste conceito, isto porque, não é possível obter uma imagem global do sistema a partir de uma única tecnologia, o que obriga a que os profissionais que avaliam o estado de condição dos equipamentos sejam multifacetados e não apenas especialistas numa área.

A internet também assume um papel importante quando se fala no futuro da monitorização da condição. Hoje em dia há sistemas capazes de gerar *e-mails*, ou até mesmo *web sites*, permitindo aos utilizadores aceder a uma vasta quantidade de informação apenas com um simples *browser* (Mobius Institute, 2005).



## Capítulo 4 - Análise de Vibrações

- 4.1 Introdução
- 4.2 Conceitos básicos sobre vibrações
- 4.3 Técnicas de análise de vibrações
- 4.4 Equipamentos de medida
- 4.5 ISO 2372 (Intensidade da vibração)

### 4.1 Introdução

A análise de vibrações é uma técnica integrada num grande e variado número de áreas. Devido a este carácter interdisciplinar, esta área proporciona, a quem nela trabalha, novos e verdadeiros desafios todos os dias. É uma área em que a aprendizagem é constante, e por tudo isto, impõe grande empenho a quem quer tornar-se especialista (Brandt, 2011).

Este estudo não pretende ser exaustivo na área das vibrações, mas sim, estudar o que se pode concluir sobre a condição de um equipamento, a partir da análise dos dados de vibrações medidos, recorrendo para isso à implementação do controlo estatístico.

Apesar de o estudo aprofundado das vibrações estar fora do âmbito deste trabalho, torna-se pertinente apresentar alguns conceitos base desta temática.

### 4.2 Conceitos básicos sobre vibrações

A vibração consiste no movimento oscilatório em torno de uma posição de equilíbrio, manifestando-se quando um elemento é deslocado da sua posição de equilíbrio, devido a uma energia transmitida ao sistema, por uma força externa (Kelly, 2000).

A Figura 4.1 representa esse movimento oscilatório, provocado pela compressão ou alongamento de uma mola quando se desloca a massa (bloco) para a esquerda ou para a direita respectivamente.

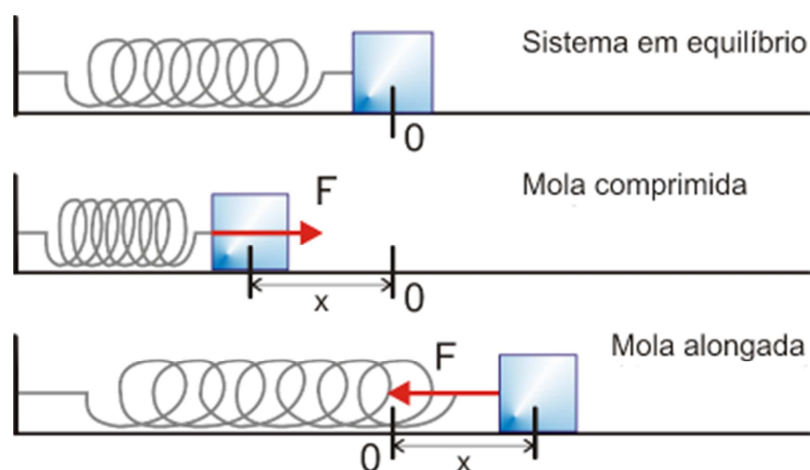


Figura 4.1 Sistema massa mola

A vibração necessita portanto de uma força que coloque a massa em movimento. Neste caso é necessário uma força que desloque a massa para a esquerda (uma distancia  $x$ ), comprimindo a mola, que posteriormente fará o movimento contrário, passando pela posição de equilíbrio e atingindo a mesma distancia  $x$  para o lado direito, alongando a mola. Este movimento é repetido enquanto a força estiver a ser exercida na massa. O movimento harmónico simples descreve a vibração e pode ilustrar-se em termos gráficos pela Figura 4.2.

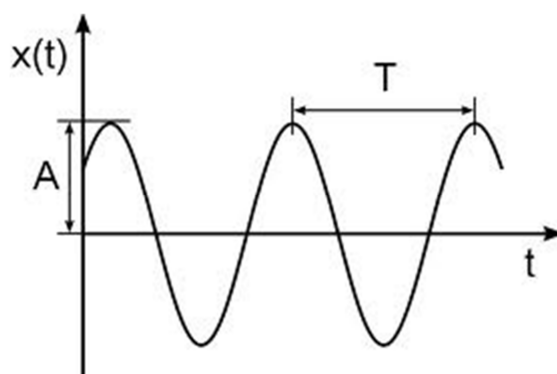
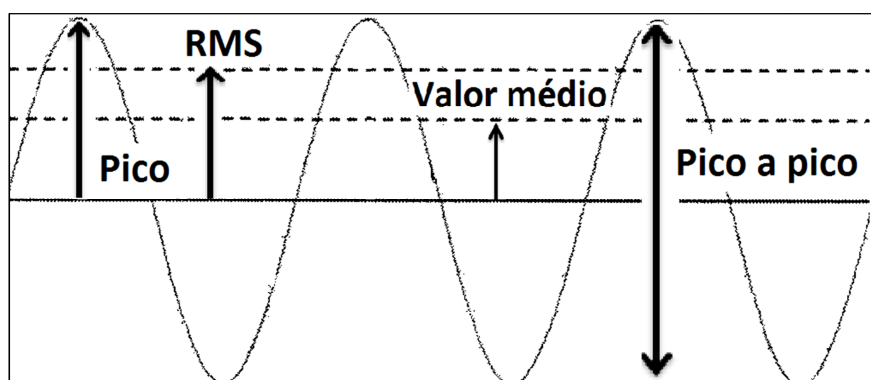


Figura 4.2 Movimento harmónico simples

Na Figura 4.2, estão ainda representados dois conceitos importantes no que toca à compreensão das vibrações, sendo eles o período ( $T$ ) e a amplitude ( $A$ ).

O **período** pode ser definido como o tempo que é necessário para completar um ciclo, sendo dado pelo inverso da frequência  $\left(T = \frac{1}{f}\right)$ .

A **amplitude** indica a severidade da vibração, isto é, quanto maior a amplitude maior a vibração. Esta pode ser expressa em valor pico a pico (p-p), valor de pico (p), valor médio e em valor eficaz (RMS), como se indica na Figura 4.3.



**Figura 4.3 Formas de representar a amplitude (Adaptado de: (Mobius Institute, 2005))**

O valor pico a pico, é a distância compreendida entre o pico máximo e o pico mínimo e fornece a informação da amplitude máxima da onda (Mobius Institute, 2005).

A amplitude pico, é o valor desde zero ao pico máximo ou ao pico mínimo, consoante aquele que seja maior. Na onda ilustrada na figura anterior (sinusoidal), essa distância é igual nos dois casos, no entanto isso nem sempre se verifica, isto é, o sinal máximo pode ser maior ou menor que o sinal mínimo.

O valor médio é definido como sendo o valor médio dos valores absolutos da forma de onda, sendo esta medida raramente utilizada.

O valor eficaz (RMS) é a mais importante medida da amplitude uma vez que mostra a média da energia contida no movimento vibratório, ou seja, mostra o potencial destrutivo da vibração.

A amplitude pode ser expressa em várias medidas (Mobius Institute, 2005), como se refere na Tabela 4-1.

**Tabela 4.1 Unidades de vibração**

• Deslocamento	m, mm, $\mu\text{m}$
• Velocidade	m/s, mm/s
• Aceleração	$\text{m/s}^2$

Outro conceito importante é a **frequência**, que se define pelo número de vezes que ocorre o movimento completo em determinado tempo, sendo geralmente dada em ciclos por minuto (CPM) ou ciclos por segundo (Hz).

A recolha de vibrações pode ser feita em diferentes unidades como se referiu anteriormente, no entanto a escolha dessas unidades não é aleatória, estando relacionada com a velocidade de rotação da máquina, seguindo-se para isso o critério apresentado na Tabela 4-2 (Mobius Institute, 2005).

**Tabela 4.2 Unidades de vibração para cada gama de velocidade de rotação da máquina**

<1000 RPM	<ul style="list-style-type: none"><li>• Deslocamento</li></ul>
1000 RPM e 6000 RPM	<ul style="list-style-type: none"><li>• Velocidade</li></ul>
> 10000RPM	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aceleração</li></ul>

### 4.3 Técnicas de análise de vibrações

Duas das técnicas de monitorização de vibrações vulgarmente utilizadas são a monitorização do nível global de vibração e a análise espectral (análise em frequência).

#### ***Monitorização do nível global de vibração***

A análise de vibrações feita pelo nível global (que representa o valor eficaz do sinal, RMS), é bastante utilizada, apresentando no entanto algumas limitações, uma vez que a sua análise permite apenas fazer o diagnóstico do equipamento, não possibilitando a descoberta da avaria em concreto. Esta é uma ferramenta basicamente de detecção.

Tal como já foi dito, as vibrações podem ser medidas em termos de aceleração, velocidade ou deslocamento, contudo, na monitorização do nível global de vibração é usual utilizar-se como medida a velocidade. A maior desvantagem desta técnica, é a necessidade de uma posterior análise para conseguir identificar o tipo de avaria em causa.

Na presente dissertação, os dados tratados da vibração do equipamento, referem-se ao nível global da vibração, em unidades de velocidade.

#### ***Análise espectral***

Esta técnica utiliza normalmente um sistema de filtragem, possibilitando a selecção de partes do espectro de vibrações.

Nos equipamentos, a vibração pode ter várias fontes, como por exemplo, desequilíbrios, desalinhamentos, veios empenados, engrenagens desgastadas ou danificadas, aperto/fixação deficiente, atrito ou ressonância (Harris, 2002).

Recorrendo a este tipo de análise, é possível descobrir qual a fonte da avaria, indo muito para além da simples detecção, uma vez que as diferentes avarias manifestam-se de diferentes formas no espectro.

## 4.4 Equipamentos de medida

Para efectuar uma análise de vibrações, é necessário recorrer a equipamentos de medição capazes de medir o sinal vibratório. Estes acessórios são denominados por transdutores. Existem três tipos de transdutores, os de deslocamento, de velocidade e de aceleração (Scheffer e Girdhar, 2004).

Os transdutores para medir o deslocamento são transdutores relativos ou de proximidade enquanto os transdutores para medir velocidade e aceleração são os transdutores absolutos.

Os acelerómetros são os transdutores mais utilizados na medição de vibrações em equipamentos (sendo também o utilizado na recolha dos dados analisados na parte experimental desta dissertação), pelo que só estes serão abordados.

### ➤ Acelerómetros

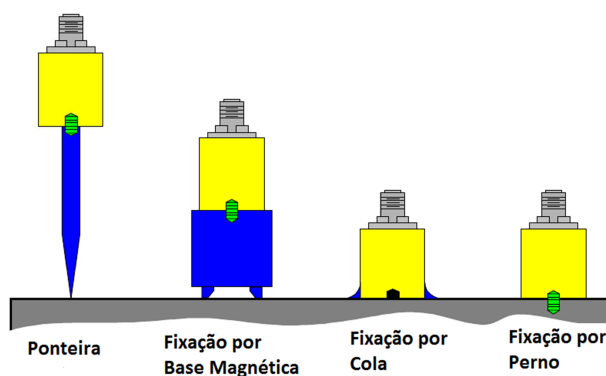
O princípio de funcionamento dos acelerómetros assenta na criação de um sinal eléctrico, proporcional à vibração a que está sujeito (Scheffer e Girdhar, 2004).

Os acelerómetros têm uma vasta aplicação, desde colectores de dados a sistemas de monitorização permanentes, podendo ser utilizados em quase todos os ambientes e em quase todas as máquinas existentes no mercado.

Estes equipamentos são extremamente fáceis de instalar e são bastante resistentes. Têm ainda a possibilidade do sinal de saída ser em velocidade ou em deslocamento (através de integração interna).

### ***Fixação dos acelerómetros***

O método de fixação do acelerómetro à máquina afecta a resposta obtida aquando da medição, sendo que uma correcta montagem do transdutor na máquina é essencial para a obtenção de dados correctos. Existem basicamente quatro métodos para fixar um acelerómetro, representados na Figura 4.4.



**Figura 4.4 Tipos de fixação do acelerómetro (Adaptado de: Roque, 2005)**

Seja qual for o método de fixação escolhido para efectuar as medições com o acelerómetro, serão provocadas alterações na resposta obtida, uma vez que a introdução, no sistema, de peças ou interfaces contribuem para essa diminuição de precisão nos resultados obtidos.

O uso de ponteira deve ser evitada, sempre que possível, pois é difícil garantir que se exerça a mesma força de contacto em todas as leituras, além de apresentar fraca transmissibilidade.

A base magnética é um método de fixação bastante utilizado, embora a existência de duas interfaces (acelerómetro-base magnética e base magnética-máquina) se traduza em alguma perda de sinal, que pode ser minimizada com a lubrificação das superfícies de contacto.

A utilização do acelerómetro deve ter em vista a minimização do número de interfaces entre o acelerómetro e a máquina. Assim o melhor método de fixação é o que utiliza o perno roscado, uma vez que tem apenas uma interface (acelerómetro-máquina) (Roque, 2005).

### **4.5 Norma ISO 2372:2003 (Intensidade da vibração)**

Todos os equipamentos vibram quando estão a trabalhar, mesmo estando a operar em perfeitas condições. O grande objectivo da utilização da análise de vibrações na monitorização da condição é portanto perceber quando é que a vibração medida deixa de ser a dita “normal”, para um determinado equipamento, e passa a ter valores acima desse patamar.

Existem normas que permitem avaliar a intensidade da vibração de uma máquina através da comparação dos valores medidos na máquina com os valores normalizados.

A norma ISO 2372:2003 é uma das normas mais divulgadas no que toca à orientação da intensidade vibratória das máquinas, através da medição do nível global da vibração em máquinas que operam entre os 600 e 12000 RPM (rotações por minuto).



Vibration Severity Range Limits (Velocity) From ISO 2372		Vibration Severity Ranges for Machines Belonging to:			
In/Sec (PK)	MM/Sec (RMS)	Class I < 20 HP	Class II 20-100 HP	Class III >100 HP	Class IV >100 HP
0.015	0.28	A	A	A	A (Good)
0.025	0.45				
0.039	0.71	B	B	B	
0.062	1.12				
0.099	1.80	C	C	C	B (Allowable)
0.154	2.80				
0.248	4.50	D	D	C	C (Tolerable)
0.392	7.10			D	
0.617	11.2				
0.993	18.0				
1.540	28.0		D		
2.480	45.0				
3.940	71.0				

**Figura 4.5 Valores da intensidade da vibração (Fonte: ISO 2372:2003)**

Na tabela anterior, a gravidade do valor da vibração depende do tipo de equipamento em questão, que pode ser de classe I, II, III ou IV, sendo que estas designações traduzem-se em:

- Classe I
- Equipamentos com motores até 15 KW
- Classe II
- Equipamentos com motores de 15KW até 75KW.
- Classe III
- Equipamentos com motores de 75KW até 300KW.
- Classe IV

Equipamentos com motores com capacidade acima dos 300KW.

Segundo esta norma, a gravidade da vibração pode ser categorizada em quatro níveis, descritos por quatro letras:

- A - Bom
- B - Permitido
- C – Tolerável
- D – Não permitido



## Capítulo 5 - SPC aplicado à manutenção

- 5.1 Introdução
- 5.2 Conceito de Qualidade
- 5.3 Controlo Estatístico do Processo (SPC)
- 5.4 Cartas de controlo com dados auto-correlacionados

### 5.1 Introdução

A recolha, análise e tratamento estatístico de dados históricos dos sistemas reparáveis, têm sido a grande base da manutenção industrial. A partir destes dados históricos de tempos de falha, quer dos equipamentos quer dos seus componentes, são geralmente elaborados planos de manutenção preventiva, que permitem prever, com base em modelos estatísticos de previsão, o período óptimo de substituição dos componentes (Dias *et al.*, 2009). Através destes modelos é possível reduzir ao máximo as avarias que provocam a paragem não programada dos equipamentos.

Com a existência de vários modelos estatísticos utilizados na área da manutenção (modelos de regressão paramétrica e não paramétrica), poder-se-ia pensar que tudo estaria resolvido com a utilização de dados históricos de falhas nos sistemas, no entanto essa não é a verdade. Na maioria dos casos os dados disponíveis são escassos e/ou mal identificados o que exige um enorme trabalho suplementar de análise dos dados antes da sua modelação.

Como já foi dito antes, nos dias de hoje, os equipamentos estão cada vez mais desenvolvidos e muitos deles vêm já equipados com sensores que enviam um sinal do estado de condição dos diversos subsistemas relativamente às variáveis críticas do funcionamento dos mesmos, gerando bases de dados bastante complexas e multivariadas (salienta-se o facto de neste estudo, os dados não terem sido retirados com este tipo de sensores fixos, uma vez que o equipamento em estudo não dispunha dos mesmos, no entanto a base de dados obtida foi em tudo semelhante).

É neste contexto que as cartas de controlo, nomeadamente a de Somas Acumuladas (*CUSUM*) e da Média Móvel Exponencialmente Amortecida (*EWMA*) assumem um importante papel a nível da análise de tendências no comportamento de um determinado parâmetro ao longo do tempo (por

exemplo, o valor de velocidade de uma vibração), permitindo uma detecção atempada de situações de risco iminente de avaria (Dias *et al.*, 2009).

O presente capítulo apresenta uma abordagem teórica do Controlo Estatístico do Processo (SPC), bem como de alguns conceitos e definições fundamentais para a sua aplicação e compreensão. A temática da Qualidade é também abordada, uma vez que esta é uma área que apresenta extrema importância na sociedade nos dias que correm.

O conceito de cartas de controlo é explicado com algum detalhe, visto ser esta a ferramenta utilizada na parte experimental da presente dissertação. Compreender as condições de aplicação bem como a correcta leitura dos resultados obtidos, são a base para que as conclusões retiradas após o estudo efectuado sejam as mais correctas (neste caso na monitorização da condição de um equipamento).

### 5.2 Conceito de Qualidade

A Qualidade foi desde sempre um conceito intrínseco à evolução humana. A construção de uma ferramenta sempre levou em consideração a escolha dos materiais mais adequados, as dimensões e formas mais apropriadas, para que esta desempenhasse, da melhor forma, as suas funções.

A necessidade de viver em comunidade levou ao aparecimento das primeiras populações e à necessidade urgente de abastecimento de produtos. Nestes aglomerados populacionais, o artesão assumiu um papel bastante relevante, uma vez que para além de identificar as necessidades do cliente, era também responsável por conceber, executar, inspeccionar e vender os produtos. A reputação do artesão era um ponto-chave no assumir da qualidade de um produto, e a inspecção do artigo era realizada com base na aceitação do consumidor (como ainda hoje acontece nos mercados e feiras tradicionais).

O aumento dos aglomerados populacionais reflectiu-se num consequente aumento da procura, pelo que a qualidade era deixada para segundo plano, priorizando-se a quantidade. O grande objectivo era produzir mais ao menor custo.

No final do século XIX, com a revolução industrial, desencadeada anos antes, já instalada à escala mundial e com a produção em massa sendo já uma realidade, passou a ser fundamental que os produtos satisfizessem as especificações técnicas impostas sem necessidade de ajustes (Mast, 2008). A Qualidade era assegurada através da inspecção dos produtos à saída, não se atribuindo ainda relevância à investigação das causas e à tomada de acções correctivas (Pires, 2007).

A inspecção a 100% era, no entanto, demasiado dispendiosa, demorada e, muitas vezes, inviável, pelo que, o controlo da Qualidade baseado em amostras tornou-se numa necessidade. Este procedimento mostrava-se contudo arriscado, uma vez que uma amostra podia ser demasiado optimista ou pessimista no que diz respeito à impressão de um lote. Em 1930, Harold Dodge, publica

tabelas que relacionam a dimensão da amostra com o risco que representa para o consumidor e para o produtor (Gomes, 2004).

Em 1931, Shewhart elaborou um estudo científico acerca do controlo de Qualidade, que se revelou de extrema importância para o desenvolvimento das cartas de controlo. Estas passaram a ser utilizadas como uma ferramenta diferenciadora entre causas comuns e causas especiais de variação (Mast, 2008).

Crosby em 1979, ao escrever o livro *Quality Is Free*, com grande impacto, introduz o conceito de zero defeitos e afirma que a qualidade não deve ter um custo associado. Para ele, o investimento nesta área é sempre compensado desde que a boa produção seja conseguida à primeira (Mast, 2008).

Em 1999 Juran define o conceito de qualidade sob dois pontos de vista, o do consumidor e o do produtor. Para o primeiro, um produto tem qualidade se apresentar características necessárias e proporcionar-lhe satisfação, já para o produtor, qualidade é produzir sem defeitos.

Outra grande contribuição foi a de Ishikawa, que desenvolveu ferramentas como o diagrama de causa-efeito apoiando-se na ideia de que a gestão da qualidade consiste no desenvolvimento, produção e serviço de um produto de forma económica, útil e satisfatória para o consumidor (Gomes, 2004).

Montgomery (2009) afirma que a qualidade é inversamente proporcional à variabilidade, ou seja, se a variabilidade nas características fundamentais do produto diminuir, a qualidade do produto vai aumentar.

Baseado nas filosofias de Deming e Juran, nasce em 1980, o conceito de Gestão pela Qualidade Total (*TQM – Total Quality Management*). É definido como uma filosofia de gestão extensível a todos os processos da organização, com o envolvimento de todos os seus intervenientes, por forma não só a assegurar como também exceder as expectativas dos clientes, colaboradores e sociedade em geral (Pereira e Requeijo, 2008).

Ao longo do século XX foram desenvolvidas as chamadas 14 Ferramentas da Qualidade que, embora simples, têm contribuído decisivamente para a resolução dos mais variados problemas, permitindo desta forma uma melhoria contínua do desempenho quer de empresas industriais quer de empresas vocacionadas para a prestação de serviços (Pereira e Requeijo, 2008).

A Qualidade é um conceito com uma grande componente subjectiva, é difícil e por vezes impossível, medir ou controlar com precisão a Qualidade de um produto ou de um serviço, para tal “a qualidade necessita de ser objectiva e quantificada de forma a ser mensurável, de outro modo não existirá possibilidade de controlo; mesmo as características subjectivas devem ter, sempre que possível, alguma forma de medição (ou comparação)” (Pires, 2007).

É perceptível que a Qualidade suscitou desde sempre o interesse de vários autores, conduzindo a uma evolução histórica relevante, e levando-a até aos consumidores. Vários foram os contributos

dados pelos chamados gurus da Qualidade, no entanto, apesar de diferentes pontos de vista, todos realçam um conjunto de elementos que se tornaram pilares da Teoria da Qualidade: envolvimento da gestão de topo, envolvimento e autonomia dos colaboradores, gestão baseada em métricas e factos, utilização de ferramentas estatísticas para controlo da variabilidade e ênfase no cliente (Gomes, 2004).

No capítulo 2 apresentou-se uma breve descrição da evolução do conceito de manutenção industrial ao longo dos últimos anos. Comparando essa evolução com a do conceito de Qualidade, verifica-se que estes estão intimamente ligados.

As necessidades do Homem foram desde sempre o grande motor da evolução destes dois conceitos, sendo que conseguir um implica quase sempre investir no desenvolvimento do outro.

### 5.3 Controlo Estatístico do Processo (SPC)

O Controlo Estatístico do Processo (SPC) surgiu em 1931, com Walter Shewhart, e tornou-se bastante popular, devido às estratégias da Qualidade adoptadas pelo Japão e pelos EUA naquela época (Cox, 2009).

Esta é uma metodologia geralmente aplicada à monitorização de processos, que permite controlar o comportamento dos mesmos, reduzir a sua variabilidade, e determinar, a partir de estimativas dos parâmetros do processo, se este é capaz de produzir de acordo com especificações pré-definidas (Prajapati e Mahapatra, 2008)

A variabilidade de um processo deve-se a muitas fontes, sendo as principais, os equipamentos, as matérias-primas, a mão-de-obra, o meio ambiente, os métodos e a metrologia. Estas fontes podem resultar em causas de variação que se dividem em causas especiais (provocam um padrão de variações que varia com o tempo de forma imprevisível) e causas comuns (produzem uma variação controlada com um padrão estável aleatório e consistente ao longo do tempo) (Wheeler, 1995).

A redução das causas comuns requer um grande investimento, normalmente, só é possível introduzindo alterações no sistema de produção. As causas especiais de variação são detectadas pelos operadores no processo e imediatamente removidas (Pereira e Requeijo, 2008).

Quando surgiu o SPC, a sua aplicação era basicamente no controlo e melhoria de processos de produção. Hoje a aplicação desta ferramenta há muito extrapolou o domínio dos sistemas produtivos convencionais, sendo actualmente utilizada em áreas como a saúde e as finanças entre muitos outros campos (Cox, 2009).

O desenvolvimento do trabalho apresentado nesta dissertação pretende verificar a possibilidade de alargar a sua aplicação à área da manutenção. Será aplicada uma metodologia, não para monitorização do processo, mas sim para a análise da condição do equipamento, conseguindo desta forma, verificar as necessidades de intervenção no mesmo.

As principais ferramentas do Controlo Estatístico do Processo são sete (Fluxogramas, Folhas de Registo de Verificação, Histogramas, Diagramas de Pareto, Diagrama Causa e Efeito, Gráficos de Dispersão e Cartas de Controlo), no entanto, a que melhor se adequa à monitorização do processo em tempo real permitindo uma redução de unidades não conformes através da introdução de medidas correctivas são as cartas de controlo (Montgomery, 2009).

### 5.3.1 Cartas de controlo

As cartas de controlo aplicam-se para verificar a estabilidade do processo. Se a variável em análise apresentar uma distribuição de probabilidade que se mantém constante ao longo do tempo, o processo está sob controlo estatístico. Pelo contrário, se esta distribuição variar ao longo do tempo, o processo encontra-se fora de controlo (Woodall, 2000).

Uma carta de controlo é definida por um gráfico que mostra a evolução ao longo do tempo de uma estatística ( $\omega$ ) referente a uma determinada característica da qualidade. A Figura 5.1 ilustra uma carta de controlo, onde para além do padrão de evolução do processo dado pelo par  $(t, \omega)$ , estão ainda representados os limites, superior (LSC), inferior (LIC) e linha central (LC). O padrão deve apresentar-se perfeitamente aleatório no intervalo compreendido entre os limites para que o processo seja considerado sob controlo estatístico (Pereira e Requeijo, 2008).

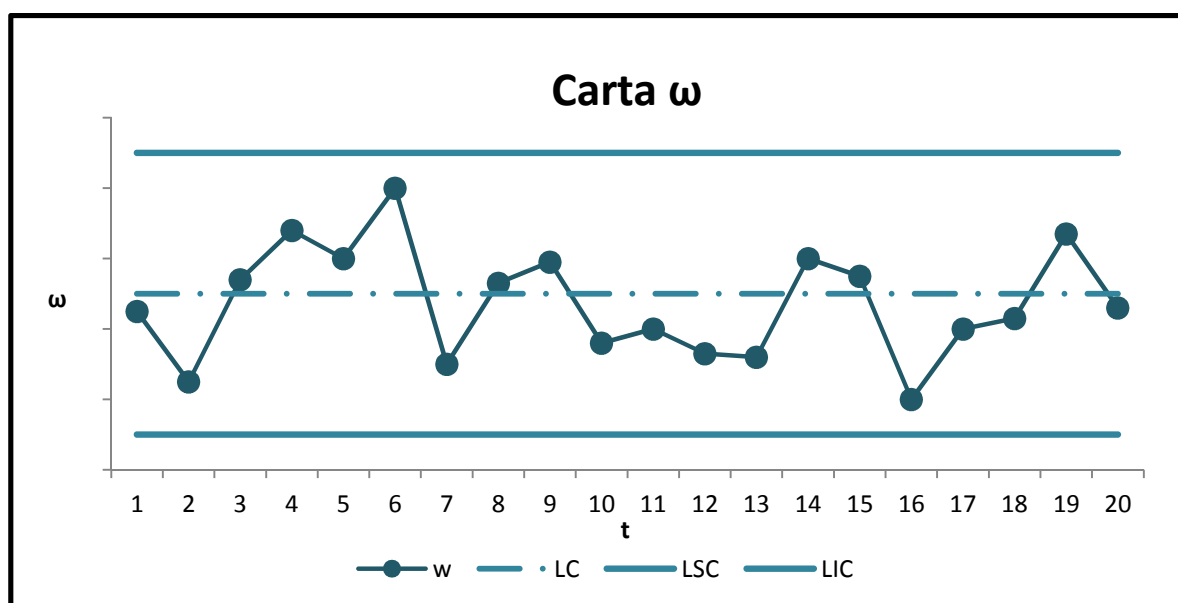


Figura 5.1 Carta de Controlo

O cálculo dos limites de controlo das cartas de Shewhart, assumindo-se que os valores da estatística  $\omega$  seguem uma distribuição aproximadamente Normal  $N(\mu_{\omega}, \sigma_{\omega}^2)$ , é efectuado através das equações (5.1) (Pereira e Requeijo, 2008):

$$\begin{aligned}
 LSC &= \mu_{\omega} + 3\sigma_{\omega} \\
 LC &= \mu_{\omega} \\
 LIC &= \mu_{\omega} - 3\sigma_{\omega}
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

onde  $\mu_{\omega}$  e  $\sigma_{\omega}$  representam respectivamente a média e o desvio padrão da estatística  $\omega$ . Os limites de controlo definidos estão localizados a  $\pm 3\sigma_{\omega}$  da linha central, isto significa que a probabilidade de um qualquer ponto se situar entre os limites de controlo é de 99,73%.

A análise das cartas de controlo tem sempre a si associado um risco, que pode ser do tipo I ou do tipo II. O risco do tipo I ( $\alpha$ ), também designado por risco do produtor, verifica-se quando se conclui que um processo está fora de controlo estatístico, quando na realidade este não está. Já o risco do tipo II ( $\beta$ ), ou risco do consumidor, acontece quando se considera o processo sob controlo quando na verdade este está fora de controlo. De salientar que quando se afastam os limites de controlo da linha central, diminui-se o risco do tipo I mas aumenta-se o risco do tipo II (Montgomery e Runger, 2006).

Outro aspecto relevante refere-se ao facto de o processo de construção de uma carta de controlo ser um processo iterativo, no qual se distinguem duas fases: a Fase 1 e a Fase 2. Na primeira, desconhecem-se ainda os parâmetros do processo, e consiste num controlo retrospectivo, na Fase 2 é feita a monitorização tendo por base a estimação dos parâmetros realizada na Fase 1.

Durante a Fase 1, os pontos que se encontram fora de controlo estatístico devem ser eliminados e construída uma nova carta de controlo. Apenas quando o processo se encontra sob controlo estatístico se procede à estimação dos parâmetros, e ao estudo da capacidade do processo. Na Fase 2, sempre que se detectarem causas especiais de variação, estas devem ser investigadas e implementadas medidas correctivas (Pereira e Requeijo, 2008).

Outro aspecto importante na construção das cartas de Shewhart é a falta de sensibilidade na detecção de pequenas ou moderadas alterações dos parâmetros do processo. Sendo o principal objectivo desta dissertação a detecção de alterações das vibrações de um equipamento através das cartas de controlo, a fase de monitorização será efectuada recorrendo às cartas de controlo *CUSUM* (Carta de Somas Acumuladas) e *EWMA* (Carta de Média Exponencialmente Amortecida). Este tipo de cartas permite aumentar a sensibilidade de detecção de causas especiais de variação, sem aumentar os custos (Pereira e Requeijo, 2008).

#### ➤ Medidas de desempenho das cartas de controlo

Uma importante medida para avaliar o desempenho das cartas de controlo é dado pelo valor de ARL (*Average Run Length*), definido como o número médio de pontos representados numa carta antes de uma situação de fora de controlo. É desejável que este valor seja o maior possível quando o processo se encontra sob controlo estatístico,  $ARL_{Em\ Controlo}$ , (minimizando-se desta forma o número de falsos



alarmes), e o menor possível quando se encontra fora de controlo,  $ARL_{Fora\ de\ Controlo}$ , (aumentando a rapidez de detecção de alterações dos parâmetros do processo).

No caso das cartas de Shewhart e em processos em que as observações são independentes estes valores são calculados através das equações (5.2) (Pereira e Requeijo, 2008):

$$\begin{aligned} ARL_{Em\ Controlo} &= \frac{1}{\alpha} \\ ARL_{Fora\ de\ Controlo} &= \frac{1}{1-\beta} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Para estas cartas,  $\alpha = 0,27\%$ , o que significa que em média existirá um falso alarme de 370 em 370 pontos, isto é, um ponto que pertence à distribuição de  $\omega$  está fora dos limites de controlo.

#### ➤ Regras de detecção de causas especiais

Assim como um ponto fora dos limites de controlo indica a existência de causas especiais de variação, também a existência de padrões não aleatórios o indicam.

Com o objectivo de identificação desses padrões, a Western Electric Handbook publicou um livro em 1956 onde constam um conjunto de 8 regras que indicam a presença de causas especiais de variação. Ao longo dos anos, várias regras têm surgido, no entanto não diferem substancialmente umas das outras. As regras consideradas na norma ISO 8258:1991 descrevem-se na Tabela 5-1:

Tabela 5.1 Regras para detecção de causas especiais de variação (Fonte: ISO 8258:1991)

Regra 1	Um qualquer ponto fora dos limites de acção ( $LC \pm 3\sigma_\omega$ )
Regra 2	Nove pontos consecutivos na zona C ou para além da mesma do mesmo lado da linha central
Regra 3	Seis pontos consecutivos no sentido ascendente ou descendente
Regra 4	Catorze pontos consecutivos crescendo e decrescendo alternadamente
Regra 5	Dois de três pontos consecutivos na zona A, do mesmo lado da linha central
Regra 6	Quatro de cinco pontos consecutivos na zona B ou A, do mesmo lado da linha central
Regra 7	Quinze pontos consecutivos na zona C, acima e abaixo da linha central
Regra 8	Oito pontos consecutivos de ambos os lados da linha central, sem nenhum na zona C

Para a aplicação destas regras, considera-se que o intervalo compreendido entre os limites de controlo  $LC \pm 3\sigma_\omega$  se encontra dividido em seis zonas iguais, cada uma correspondente a  $1\sigma_\omega$  e designadas por A, B e C e C, B, A em que a zona C é simétrica à zona central.

A representação esquemática dessas oito regras apresenta-se na Figura 5.2.

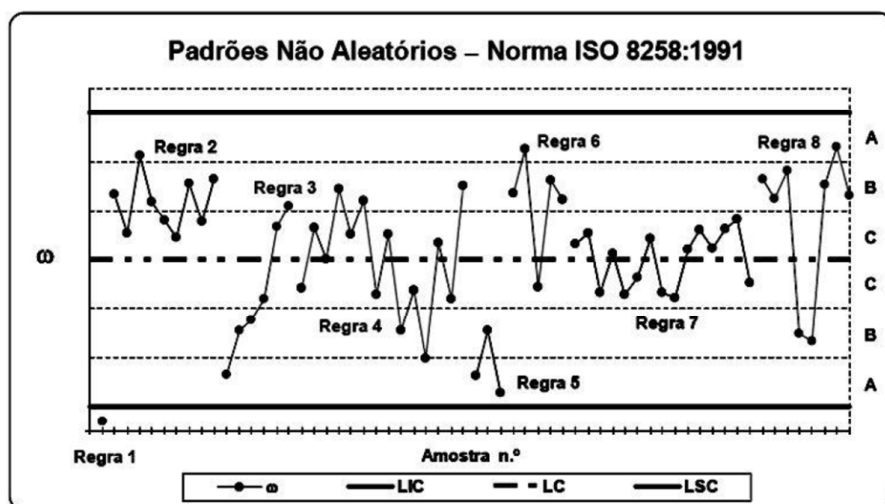


Figura 5.2 Regras para detecção de causas especiais de variação (Fonte: Pereira e Requeijo, 2008)

### ➤ Recolha de dados

Este é um passo particularmente importante na implementação do SPC, uma vez que, se não for convenientemente executado pode levar a que todas as conclusões retiradas de um estudo estejam erradas.

A recolha dos dados deve ser efectuada de acordo com o que Shewhart designou por subgrupos (amostras) racionais, isto é, as amostras devem ser seleccionadas de tal modo que, se existirem causas especiais de variação, a probabilidade de existirem diferenças entre os subgrupos é maximizada, enquanto a probabilidade de se detectarem diferenças dentro dos subgrupos é minimizada (Montgomery, 2009).

É necessário ter em consideração que, para que os limites e os parâmetros sejam representativos do processo em questão, um número suficiente de amostras é fundamental, por isso, na Fase 1 define-se o número de amostras,  $m$ , a frequência de amostragem e a dimensão da amostra,  $n$ , que melhor se adequam ao processo.

Muitos autores referem que no caso em que os dados são observações individuais, devem ser recolhidas no mínimo 100 observações. No entanto, Quesenberry (1997), estabelece uma relação entre o número de amostras e a sua dimensão dada pela inequação (5.3).

$$m \geq \frac{400}{(n-1)} \quad (5.3)$$

De acordo com esta regra, se  $n = 5$  teriam de ser recolhidas pelo menos 100 amostras e não apenas 25 ou 30 que é a pratica corrente. Já para observações individuais, o número mínimo de dados a recolher na Fase I seria de 300.

Em situações práticas estas recomendações podem gerar dificuldades, no entanto, sempre que possível, devem ser seguidas de modo a aumentar a fiabilidade dos resultados obtidos para as estimativas dos limites e dos parâmetros do processo.

#### 5.3.2 Tipos de cartas de controlo

As cartas de controlo são geralmente distinguidas em dois tipos, **variáveis** e **atributos**.

As cartas de variáveis são aquelas cujas características em estudo podem ser expressas numa escala contínua. Para estas situações devem ser construídas duas cartas, uma para controlar o parâmetro de localização e outra para controlar o parâmetro de dispersão da população.

As cartas de atributos são as utilizadas quando as características da qualidade não podem ser medidas numa escala contínua mas sim discreta (como é exemplo de unidades de produto não conforme detectado numa linha de produção). Para esta situação é apenas construída uma carta.

A Figura 5.3 sintetiza os tipos de cartas mais utilizadas para o controlo de variáveis e atributos.

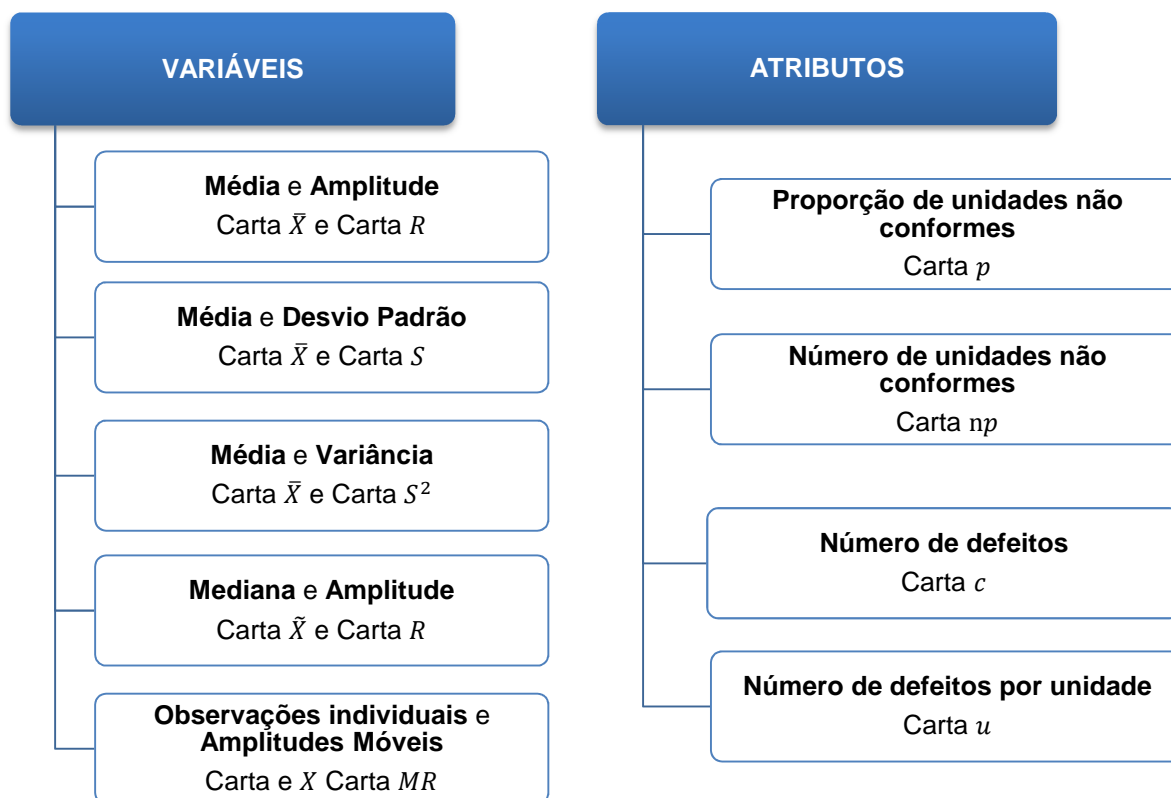


Figura 5.3 Tipos de cartas de controlo

Na presente dissertação a característica estudada é uma variável contínua, pelo que só serão abordados os conteúdos relacionados com este tipo de cartas.

#### ➤ Cartas de controlo da média e da amplitude

Para a construção destas cartas começa-se pelo cálculo da média e da amplitude recorrendo às expressões (5.4) e (5.5) respectivamente.

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n} \quad (5.4)$$

$$R_i = X_{max} - X_{min} \quad (5.5)$$

Quando os parâmetros do processo não são conhecidos os limites das cartas são dados pela Tabela 5-2:

**Tabela 5.2 Limites de controlo das cartas  $\bar{X}$  e  $R$**

$LSC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R}$	$LSC_R = D_4 \bar{R}$
$LC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}}$	$LC_R = \bar{R}$
$LIC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R}$	$LIC_R = D_3 \bar{R}$

Os valores de  $\bar{\bar{X}}$  e  $\bar{R}$  são dados por

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{X}_i}{m} \quad (5.6)$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^m R_i}{m} \quad (5.7)$$

➤ **Cartas de controlo da média e do desvio padrão**

Quando a dimensão da amostra é superior a 10, não é aconselhável usar as cartas anteriormente apresentadas para estimar a dispersão do processo, utilizando-se nesse caso as cartas da média e do desvio padrão.

Nesta situação os valores de  $\bar{X}$  e  $\bar{\bar{X}}$  são obtidos por (5.4) e (5.6) respectivamente. Já o valor do desvio padrão é dado por:

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X}_j)^2}{n-1}} \quad (5.8)$$

Os limites calculam-se através das expressões apresentadas na Tabela 5-3

**Tabela 5.3 Limites de controlo das cartas  $\bar{X}$  e  $S$**

$LSC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_3 \bar{S}$	$LSC_S = B_4 \bar{S}$
$LC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}}$	$LC_R = \bar{S}$
$LIC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_3 \bar{S}$	$LIC_S = B_3 \bar{S}$

➤ **Cartas de controlo da média e da variância**

Neste caso em vez de se implementar uma carta  $\bar{S}$ , define-se uma carta que controla a variância amostral  $S^2$ . Para esta situação os limites são dados na Tabela 5-4:

**Tabela 5.4 Limites de controlo das cartas  $\bar{X}$  e  $S^2$**

$LSC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + 3\sqrt{\frac{\bar{S}^2}{n}}$	$LSC_{S^2} = \frac{\bar{S}^2}{n-1} \chi_{\frac{\alpha}{2};n-1}^2$
$LC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}}$	$LC_R = \bar{S}^2$
$LSC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - 3\sqrt{\frac{\bar{S}^2}{n}}$	$LSC_{S^2} = \frac{\bar{S}^2}{n-1} \chi_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right);n-1}^2$

Onde  $\chi_{\frac{\alpha}{2};n-1}^2$  e  $\chi_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right);n-1}^2$  representam, respectivamente, os valores críticos superiores e inferiores da distribuição do  $\chi^2$  com  $n-1$  graus de liberdade para um nível de significância igual a  $\alpha$ .

➤ **Cartas de controlo de observações individuais e amplitudes móveis**

Estas são cartas aplicadas quando as amostras são constituídas por uma única observação individual ( $n=1$ ). Nestas situações, não é possível calcular uma estatística que dê indicações sobre a dispersão do processo. Assim, esta é controlada com base em “amostras fictícias” constituídas por observações consecutivas, com as quais se calcula a amplitude móvel (normalmente formam-se amplitudes móveis de dois valores, dadas por  $|X_2 - X_1|, |X_3 - X_2|, \dots, |X_m - X_{m-1}|$ ).

Os limites destas cartas são dados por:

**Tabela 5.5 Limites de controlo das cartas  $\bar{X}$  e  $MR$**

$LSC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + \frac{3\overline{MR}}{d_2}$	$LSC_{MR} = D_4 \overline{MR}$
$LC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}}$	$LC_{MR} = \overline{MR}$
$LIC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - \frac{3\overline{MR}}{d_2}$	$LIC_{MR} = D_3 \overline{MR}$

em que

$$\bar{X} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_i \quad (5.9)$$

$$\overline{MR} = \frac{1}{m-1} \sum_{i=2}^m MR_i \quad (5.10)$$

Para todas as cartas apresentadas anteriormente, os valores das constantes  $A_2, A_3, B_3, B_4, D_3, D_4$  e  $d_2$  são obtidos com base na dimensão da amostra, ou no caso das últimas, no número de observações utilizadas para calcular a amplitude móvel. Estes valores são apresentados na tabela I.1 do Anexo I.

Concluída a Fase 1 do controlo estatístico e verificada a estabilidade do processo procede-se à estimação dos parâmetros  $(\mu, \sigma)$ . A Tabela 5-6 apresenta os estimadores para estes parâmetros, para cada uma das cartas.

**Tabela 5.6 Estimação dos parâmetros do processo**

	Média ( $\mu$ )	Desvio Padrão ( $\sigma$ )
Carta $\bar{X}$ e $R$	$\hat{\mu} = \bar{\bar{X}}$	$\hat{\sigma} = \bar{R} / d_2$
Carta $\bar{X}$ e $S$	$\hat{\mu} = \bar{\bar{X}}$	$\hat{\sigma} = \bar{S} / c_4$
Carta $\bar{X}$ e $S^2$	$\hat{\mu} = \bar{\bar{X}}$	$\hat{\sigma} = \bar{S}^2$
Carta $\tilde{X}$ e $R$	$\hat{\mu} = \bar{\bar{X}}$	$\hat{\sigma} = \bar{R} / d_2$
Carta $X$ e $MR$	$\hat{\mu} = \bar{\bar{X}}$	$\hat{\sigma} = \overline{MR} / d_2$

### 5.3.3 Condições de aplicabilidade do SPC

Os desenvolvimentos apresentados anteriormente pressupõem que os dados da característica da qualidade,  $X$ , sejam independentes e identicamente distribuídos segundo uma distribuição Normal com média  $\mu$  e variância  $\sigma^2$ . Isto significa que, em qualquer instante  $t$ ,  $X$  é definida por  $X_t = \mu + \mathcal{E}_t$  em que  $\mathcal{E}$  é uma variável aleatória com médias zero e variância  $\sigma^2$ , designada por ruído branco.

#### ➤ Aleatoriedade dos dados

A não aleatoriedade ocorre quando os dados não descrevem um comportamento previsível. Esta situação pode acontecer, por exemplo, devido à mistura de populações ou correlação entre observações consecutivas ou desfasadas no tempo.

Os métodos mais utilizados para verificação deste pressuposto são: o *teste das sequências*, o *teste das sequências ascendentes e descendentes* e o *teste modificado do quadrado médio das diferenças sucessivas*.

Na presente dissertação não se apresentam os conceitos destas abordagens, no entanto para uma compreensão dos mesmos, pode consultar-se (Pereira e Requeijo, 2008).

### ➤ Normalidade dos dados

Este pressuposto indica a necessidade dos dados seguirem uma distribuição, aproximadamente, Normal para que seja possível aplicar as cartas de controlo. A falha deste pressuposto pode levar a conclusões erradas aquando da análise das cartas (exemplo destes erros são a verificação de causas especiais quando estas não existem, ou o contrário).

Existem algumas técnicas que possibilitam a verificação da Normalidade dos dados, como é o caso do teste do *Qui-Quadrado* e o teste de *Kolmorov-Smirnov*.

Caso não se confirme a Normalidade dos dados, para um determinado nível de significância  $\alpha$ , existe a possibilidade de se recorrer a uma de três abordagens (Pereira e Requeijo, 2008):

- Caracterização da distribuição dos dados;
- Transformação dos dados (transformação de Box-Cox ou transformação pelo sistema de distribuição de Johnson);
- Método da variância ponderada.

### ➤ Independência dos dados

Dizer-se que os dados não são independentes é o mesmo que afirmar que estes são auto-correlacionados, isto é, o valor que a variável  $X$  toma no instante  $t$ , depende do seu valor desfasado de  $k$  instantes  $(t - k)$ , neste caso chama-se auto-correlação de desfasamento  $k$  ("*lag k*"). A existir auto-correlação, e não sendo esta considerada, pode levar a erros na estimação dos parâmetros bem como dos limites das cartas de controlo (Pereira e Requeijo, 2008).

Quando se verifica uma situação de auto-correlação dos dados é necessário recorrer a uma abordagem diferente da abordagem tradicional na implementação do SPC.

Para verificar a existência de auto-correlação significativa recorre-se à *Função de Auto-correlação (FAC)* e à *Função de Auto-correlação Parcial (FACP)*.



### Função de Auto-correlação

Como foi dito anteriormente, a auto-correlação manifesta-se através da correlação entre observações sucessivas ou desfasadas, sendo esta definida através do coeficiente de correlação  $\rho_k$ . O conjunto formado pelos coeficientes de correlação, para  $k = 1, 2, 3, \dots$ , designa-se por *Função de Auto-Correlação* e é obtido através de:

$$\rho_k = \frac{Cov(X_t, X_{t+k})}{Var(X)}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (5.11)$$

em que a  $Cov(X_t, X_{t+k})$  é a covariância das observações desfasadas de  $k$  instantes.

Como a função de auto-correlação é desconhecida, é necessário estimá-la com base nos valores que a variável  $X$  toma  $(X_1, X_2, \dots, X_k, \dots, X_N)$ . Este estimador é designado por  $r_k$ , e é dado por:

$$r_k = \hat{\rho}_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (X_t - \bar{X})(X_{t+k} - \bar{X})}{\sum_{t=1}^N (X_t - \bar{X})^2} \quad (5.12)$$

Ao conjunto de estimadores de  $r_k$  dá-se o nome de *Função de Auto-Correlação Estimada (FACE)*.

Para verificar a existência de auto-correlação constrói-se um gráfico da *FACE* em função de  $k$ , geralmente designado por correlograma. O critério de decisão consiste em verificar se todos os valores de  $r_k$  (que variam entre -1 e 1) se encontram dentro de um determinado intervalo de confiança.

Este intervalo é determinado com base no valor esperado e na variância de  $r_k$ , onde  $E(r_k) \approx 0$  e  $Var(r_k)$  é determinada a partir de (Box et al., 2008):

$$Var(r_k) \approx \frac{1}{N} \sum_{v=-\infty}^{+\infty} (\rho_v^2 + \rho_{v+k} \rho_{v-k} - 4\rho_k \rho_v \rho_{v-k} + 2\rho_v^2 \rho_k^2) \quad (5.13)$$

onde um bom estimador de  $Var(r_k)$  é

$$\hat{v} = Var(r_k) \approx \frac{1}{N} \left( 1 + 2 \sum_{v=1}^{k-1} r_v^2 \right) \quad (5.14)$$

Como  $r_k$  tem uma distribuição aproximadamente Normal  $r_k \sim N(0, Var(r_k))$  o intervalo de confiança, para um nível de confiança  $\alpha$ , é dado por:

$$-Z_{\alpha/2} \sqrt{\hat{v}} \leq r_k \leq Z_{\alpha/2} \sqrt{\hat{v}} \quad (5.15)$$

A Figura 5.4 ilustra uma *FACE*, onde os dados são auto-correlacionados uma vez que existem valores de  $r_k$  fora do intervalo de confiança.

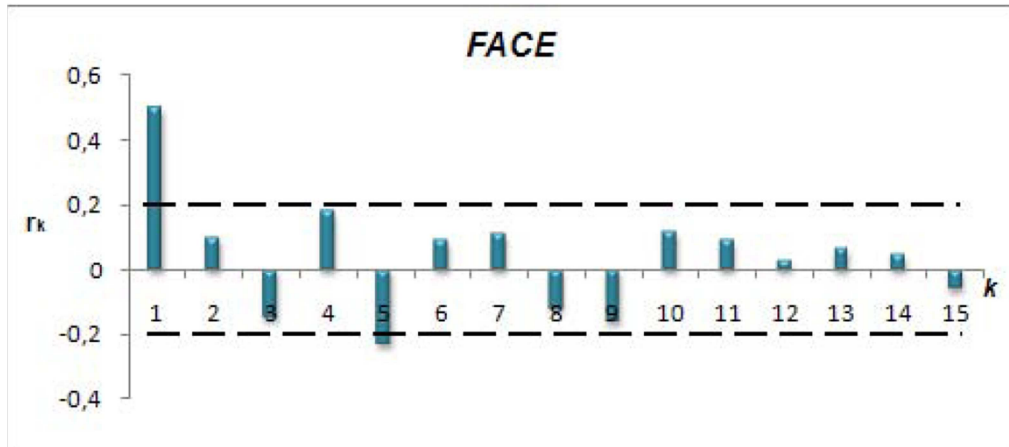


Figura 5.4 Função de Auto-Correlação Estimada (*FACE*) (Fonte: Pereira e Requeijo, 2008)

### Função de Auto-correlação Parcial

A auto-correlação parcial de desfasamento  $k$  é definida como a correlação entre  $X_t$  e  $X_{t+k}$  com os efeitos das observações  $(X_{t+1}, X_{t+2}, \dots, X_{t+k-1})$  removidas. O conjunto de valores do coeficiente de correlação parcial de ordem  $k$ ,  $\phi_{kk}$ , é designado por *Função de Auto-Correlação Parcial (FACP)*.

Para modelos  $AR(p)$  (auto-regressivos de ordem  $p$ ), a auto-correlação parcial é determinada através das equações de Yule-Walker apresentadas na equação (5.16).

$$\begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 & \dots & \rho_{k-1} \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 & \dots & \rho_{k-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \rho_{k-1} & \rho_{k-2} & \rho_{k-3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{k1} \\ \phi_{k2} \\ \vdots \\ \phi_{kK} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_k \end{bmatrix} \quad \text{ou} \quad \Phi_k = \mathbf{P}_k^{-1} \mathbf{p}_k \quad (5.16)$$

Visto que os valores de  $\phi_{kk}$  são desconhecidos, é necessário estimar a função de auto-correlação estimada. Substituindo na equação anterior os valores de  $\rho_k$  pelos valores estimados  $r_k$  obtém-se as

estimativas  $\phi_{11}, \phi_{22}, \phi_{33}, \dots$ , que em conjunto formam a *Função de Auto-Correlação Parcial Estimada (FACPE)*.

Nos processos, os coeficientes de auto-correlação parcial seguem, aproximadamente uma distribuição normal,  $(\phi_{kk} \sim N(0, Var(\phi_{kk})))$ , sendo o valor dessa variância, para N observações, dado pela equação (5.17).

$$Var(\phi_{kk}) \approx \frac{1}{N}, k > p \quad (5.17)$$

A verificação da existência de auto-correlação parcial é similar à de auto-correlação. Nesta situação é necessário testar se todos os valores de  $\phi_{kk}$  são significativamente diferentes de zero através do intervalo de confiança, dado por:

$$-Z_{\alpha/2} \sqrt{Var(\phi_{kk})} \leq \phi_{kk} \leq Z_{\alpha/2} \sqrt{Var(\phi_{kk})} \quad (5.18)$$

A figura que se segue apresenta um gráfico da *FACPE*, onde se verifica a existência de auto-correlação parcial significativa, uma vez que existem valores de  $\phi_{kk}$  fora do intervalo de confiança.

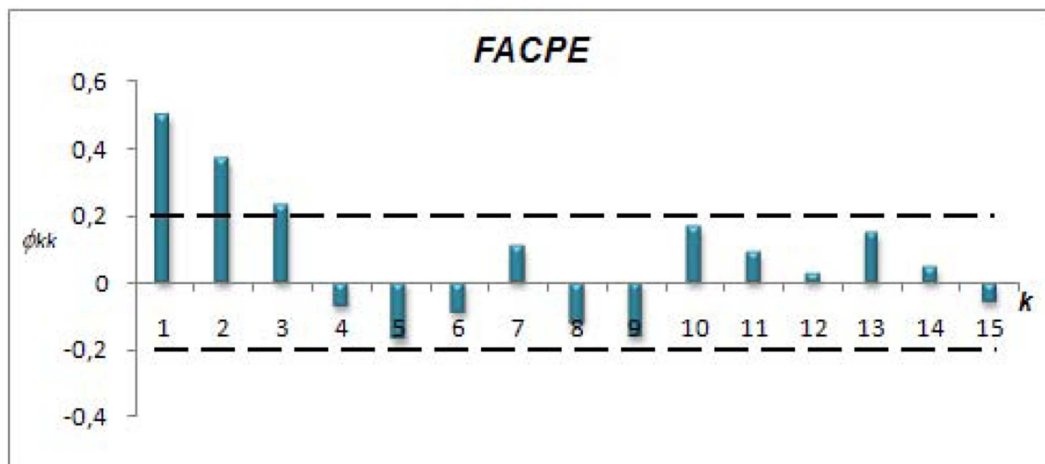


Figura 5.5 Função de Auto-Correlação Parcial Estimada (FACPE) (Fonte: Pereira e Requeijo, 2008)

## 5.4 Cartas de controlo com dados auto-correlacionados

Tal como já foi dito, a presença de auto-correlação significativa num processo produtivo tem um enorme impacto nas cartas de controlo. Deste modo é essencial que o primeiro passo na implementação de controlo estatístico passe pela verificação da independência, ou não, dos dados, aplicando a metodologia exposta no capítulo anterior.

A aplicação do SPC quando existe auto-correlação significativa divide-se basicamente em duas situações:

- Utilização de cartas convencionais de Shewhart, *CUSUM* ou *EWMA* com os limites de controlo modificados;
- Determinação do modelo matemático que melhor se ajusta aos dados auto-correlacionados e construir as cartas de controlo (Shewhart, *CUSUM* ou *EWMA*) dos resíduos ou dos erros de previsão. Com esta abordagem é possível definir as duas fases do SPC, na Fase 1 os resíduos são controlados, na Fase 2 os erros de previsão são monitorizados.

No estudo desenvolvido nesta dissertação aplicou-se a segunda abordagem, pelo que será a única detalhada em seguida. Para um maior pormenor destas abordagens sugere-se a consulta de Pereira e Requeijo (2008) e Alwan e Roberts (1988).

#### 5.4.1 Estimação dos parâmetros (Fase 1)

O primeiro passo na aplicação desta metodologia é determinar o modelo matemático que melhor se ajusta aos dados. Para isso, recorre-se aos modelos *ARIMA* (*Autoregressive Integrated Moving Average*) que permitem a modelação e análise de sucessões cronológicas.

##### ➤ Modelos *ARIMA*

Os modelos tradicionais, ou determinísticos, não permitem o estudo das sucessões cronológicas, estudando apenas variáveis mensuráveis sem recorrer à parte probabilística. Sendo grande parte dos fenómenos que nos rodeiam, dinâmicos, é necessário um estudo sob forma de uma serie temporal, surgindo assim os modelos estocásticos.

Estes modelos estocásticos podem ser estacionários ou não estacionários. A primeira opção ocorre quando, ao efectuar um deslocamento no tempo das variáveis, a distribuição é mesma. Quando esta condição não é verificada estamos perante um modelo não estacionário.

Um modelo *ARIMA* possui três componentes: auto-regressiva de ordem  $p$ , de diferenciação  $d$ , e a de médias móveis de ordem  $q$ .

Os referidos modelos são definidos por:

$$\phi_p(B) \nabla^d X_t = \Theta_q(B) \varepsilon_t \quad (5.19)$$

em que

$$\phi_p(B) = (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p) \quad (5.20)$$

$$\Theta_q(B) = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_p B^p) \quad (5.21)$$

$$B = \frac{X_{t-1}}{X_t} \quad (5.22)$$

$$\nabla = \frac{X_t - X_{t-1}}{X_t} = 1 - B \quad (5.23)$$

Nas equações anteriores  $B$  é o operador de desfasamento,  $\nabla$  o operador de diferenças,  $X_t$  a observação no instante  $t$ ,  $d$  a ordem de diferenciação para tornar o processo estacionário,  $\varepsilon_t$  o ruído branco no instante  $t$  ( $\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ ),  $\phi_p(B)$  o polinómio auto-regressivo de ordem  $p$ , e  $\Theta_q(B)$  o polinómio de médias móveis de ordem  $q$ .

Quando o processo é estacionário, este é modelado com os modelos *ARMA*, caso contrário é necessário aplicar o operador de diferenças, no sentido de transformar a variável original  $X$  numa variável estacionária  $Y$  definida, no instante  $t$ , pela equação (5.24), sendo que após esta transformação, pode determinar-se o modelo *ARMA* que melhor se ajusta à variável  $Y$ .

$$Y_t = \nabla^d X_t \quad (5.24)$$

### **Modelo auto-regressivo de ordem $p$ , $AR(p)$**

Através da análise da *FACE* é possível verificar se o modelo apresentado é auto-regressivo  $AR(p)$ , quando esta apresenta um decréscimo exponencial sem nunca atingir o zero. A ordem do modelo,  $p$ , é determinada pelo número de picos significativos apresentados na *FACPE*.

Este modelo é matematicamente definido por

$$X_t = \xi + \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-p} + \varepsilon_t \quad (5.25)$$

em que a sua média e variância são respectivamente dados por:

$$E(X) = \mu = \frac{\xi}{1 - \sum_{j=1}^p \phi_j} \quad (5.26)$$

$$Var(X) = \gamma_0 = \frac{\sigma_\varepsilon^2}{1 - \sum_{j=1}^p \rho_j \phi_j} \quad (5.27)$$

**Modelo de médias móveis de ordem  $q$ ,  $MA(q)$**

O modelo em estudo é um  $MA(q)$  quando a *FACE* apresenta um decréscimo muito significativo a partir de  $lag(q)$ , sendo que a ordem desse  $lag$  indica a sua ordem  $q$ .

Este modelo é descrito por

$$X_t = \mu + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (5.28)$$

em que a sua média e variância são respectivamente dados por:

$$E(X) = \mu \quad (5.29)$$

$$Var(X) = \gamma_0 = \sigma_\varepsilon^2 \sum_{j=1}^q \theta_j^2 \quad (5.30)$$

**Modelo misto auto-regressivo e de médias móveis,  $ARMA(p, q)$**

Este modelo surge da junção dos dois modelos apresentados anteriormente e identifica-se na *FAC* e *FACP* quando apresentam, ambos, um decréscimo exponencial, sem nunca atingir o zero, podendo este decréscimo ser positivo, negativo ou alternado.

Este modelo define-se pela seguinte equação:

$$X_t = \xi + \phi_1 X_{t-1} + \dots + \phi_p X_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (5.31)$$

em que a sua média é dada pela equação (5.26) e a variância por:

$$Var(X) = \gamma_0 = \sum_{j=1}^p \phi_j \gamma_j - \theta_1 \gamma_{X\varepsilon}(-1) - \dots - \theta_q \gamma_{X\varepsilon}(-q) + \sigma_\varepsilon^2 \quad (5.32)$$

Nas equações anteriores considera-se:

$\sigma_\varepsilon^2$	-	Variância de erro $\varepsilon$
$\mu$	-	Média do processo
$X_{t-p}$	-	Variável no instante $t - p$
$\xi$	-	Parâmetro para determinação da média do processo

$\phi_j$  - Parâmetro de ordem  $j$  do modelo  $AR$  ou  $ARMA$

$\theta_j$  - Parâmetro de ordem  $j$  do modelo  $MA$  ou  $ARMA$

$\rho_j$  - Coeficiente de correlação de desfasamento  $j$

$\gamma_j$  - Auto-covariância de desfasamento  $j$

Apresenta-se na Tabela 5-9 um resumo das características do comportamento teórico da  $FAC$  e da  $FACP$  em cada um dos modelos anteriormente apresentados.

**Tabela 5.7 Características teóricas da  $FAC$  e da  $FACP$  para cada modelo**

	$FAC$	$FACP$
$AR(p)$	Decréscimo exponencial sem nunca atingir o zero	Picos significativos até ao desfasamento $p$ , $lag(p)$ que indicarão a ordem do modelo
$MA(q)$	Picos significativos até ao desfasamento $q$ , $lag(q)$ que indicarão a ordem do modelo	Decréscimo exponencial sem nunca atingir o zero
$ARMA(p, q)$	Decréscimo exponencial positivo, negativo ou alternado, sem nunca atingir o zero	

Aconselha-se, para uma mais profunda compreensão desta temática a consulta de Box, Jenkins e Reinsel, (2008) e Pereira e Requeijo (2008).

Após a modelação do processo, o passo seguinte é a determinação dos resíduos e a verificação da sua independência. Se esta for verificada, é possível aplicar as cartas de Shewhart apresentadas no capítulo 5.3.2 para a Fase 1, sendo que agora a variável aleatória deixa de ser a característica da qualidade  $X$ , e passam a ser os resíduos (que por serem ruído branco, apresentam um valor esperado igual a zero e uma variância igual a  $\sigma_\varepsilon^2$ ).

Esta abordagem apresenta excepção relativamente ao SPC tradicional, que se prende com o facto dos pontos que denotarem a ocorrência de causas especiais de variação não serem eliminados, mas sim, substituídos pelos valores esperados nesses instantes.

Quando os resíduos provêm de amostras, constroem-se as cartas da média ( $\bar{e}$ ), da amplitude ( $R$ ) ou do desvio padrão ( $S$ ), sendo as respectivas estatísticas definidas pelas equações que se seguem:

$$\bar{e}_t = \frac{\sum_{i=1}^n e_{ti}}{n} \quad (5.33)$$

$$R_t = \max(e_{t1}, e_{t2}, \dots, e_{tm}) - \min(e_{t1}, e_{t2}, \dots, e_{tm}) \quad (5.34)$$

$$S_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_{ti} - \bar{e}_t)^2}{n-1}} \quad (5.35)$$

Quando os resíduos resultam de observações individuais, a estatística a considerar no instante  $t$  para controlar a média do processo é o resíduo  $e_t$ , enquanto a dispersão é controlada pela amplitude móvel, normalmente baseada em dois resíduos consecutivos ( $MR_t$ )

$$MR_t = |e_t - e_{t-1}| \quad (5.36)$$

Estas cartas são construídas considerando  $m$  amostras de dimensão  $n$ , ou  $N$  observações individuais, a partir das quais se determinam os valores médios

$$\bar{\bar{R}} = \frac{\sum_{t=1}^m R_t}{m} \quad \bar{\bar{S}} = \frac{\sum_{t=1}^m S_t}{m} \quad \bar{\bar{MR}} = \frac{\sum_{t=2}^N MR_t}{N-1} \quad (5.37)$$

As estimativas dos parâmetros (após se verificar a estabilidade) dependem do modelo *ARIMA* que melhor se ajusta ao processo, sendo calculadas a partir das equações (5.26) e (5.27) se o modelo for um  $AR(p)$ , (5.29) e (5.30) se for um  $MA(q)$ , (5.26) e (5.32) quando é um  $ARMA(p, q)$ .

O valor do desvio padrão dos resíduos  $\sigma_\varepsilon$  é estimada a partir de  $\sigma_e$ , defino para cada uma das situações pelo conjunto de equações (5.38).

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_\varepsilon = \sigma_e &= \frac{\bar{R}}{d_2} \\ \hat{\sigma}_\varepsilon = \sigma_e &= \frac{\bar{S}}{c_4} \\ \hat{\sigma}_\varepsilon = \sigma_e &= \frac{\bar{MR}}{d_2} \end{aligned} \quad (5.38)$$

Os limites de controlo das cartas baseadas em resíduos são apresentados na Tabela 5-10.



**Tabela 5.8 Limites de controlo das cartas de Shewhart baseadas em resíduos (Fase 1 SPC)**

	LIC	LC	LSC
$Média(\bar{e})$	$-A_2 \bar{R}$	0	$A_2 \bar{R}$
$Amplitude(R)$	$D_3 \bar{R}$	$\bar{R}$	$D_4 \bar{R}$
$Média(\bar{e})$	$-A_3 \bar{S}$	0	$A_3 \bar{S}$
$Desvio\ padrão(S)$	$B_3 \bar{S}$	$\bar{S}$	$B_4 \bar{S}$
$Resíduos(e)$	$-3\overline{MR}/d_2$	0	$3\overline{MR}/d_2$
$Amplitudes\ Móveis(MR)$	$D_3 \overline{MR}$	$\overline{MR}$	$D_4 \overline{MR}$

#### 5.4.2 Monitorização do processo (Fase 2)

Nas últimas décadas, muitos têm sido os métodos propostos para a atempada detecção de falhas em equipamentos, surgindo recentemente o SPC como uma solução possível (Wang e Zhang, 2008).

Na presente dissertação, as cartas *CUSUM* e *EWMA* são as técnicas aplicadas para fazer a monitorização do estado da condição do equipamento, esperando com esta metodologia detectar alterações significativas quando a avaria é introduzida.

Estas cartas são mais sensíveis que as cartas de Shewhart na detecção de pequenas ou moderadas alterações (Cox, 2009).

A aplicação destas cartas também é possível quando os dados apresentam auto-correlação significativa, sendo baseadas nos erros de previsão ou nos resíduos, em vez de considerarem os valores da característica da qualidade  $X$ , sendo que na presente dissertação, as cartas foram construídas com os erros de previsão.

O cálculo destes valores é feito com recurso à expressão (5.39) onde se considera-se que  $T$  é o instante actual (coincidente com o último valor da série de dados da Fase 1).

$$e_{\tau}(T) = X_{t+\tau} - \hat{X}_{t+\tau}(T) \quad (5.39)$$

Estas cartas têm por base estatísticas “com memória”, em contraposição às cartas tradicionais de Shewhart, isto significa que a análise de uma situação fora de controlo estatístico considera, não só o valor da estatística nesse instante, mas também nos instantes que o antecedem. Isto traduz-se, ainda, numa outra questão importante que é o facto destas cartas apenas detectarem alterações que sejam sustentadas no tempo, mostrando menos sensibilidade quando essa alteração é pontual (Prajapati, 2011).

Comparando estas duas técnicas, elas apresentam-se bastante semelhantes no que toca à sensibilidade de detecção de alterações, no entanto são bastante superiores às de Shewhart nesse aspecto (Cox, 2009).

Visto que, no presente estudo, se pretende detectar o momento em que o sistema reparável atinge um valor de vibração que o irá afectar irremediavelmente, apresentam-se as bases destes dois tipos de cartas, com uma modificação no sentido de detectar, tão breve quanto possível, o momento em que ocorrerá tal magnitude de vibração.

#### ➤ Carta **CUSUM** Modificada

As cartas **CUSUM** surgiram na década de 1950 por Page, tendo sido desde então objecto de estudo por parte de diversos autores, nomeadamente no que respeita ao controlo da média do processo (Pereira e Requeijo, 2008).

Esta técnica utiliza, geralmente, duas variáveis, uma para detectar aumentos,  $C$ , e outra para detectar decréscimos,  $T$  (Wu *et al.*, 2008).

Para o caso em estudo, interessa detectar aumentos, por isso a carta **CUSUM** Modificada apenas contempla a variável  $C$ , definida pela equação (5.40).

$$C_t = \max(0, C_{t-1} + (Z_t - k)) \quad ; \quad C_0 = 0 \quad (5.40)$$

em que

$$Z_t = \frac{e_t - T_L}{\sigma_\varepsilon / \sqrt{n}} \quad (5.41)$$

$$T_L = (T_L)_N - \Delta_S - \mu \quad (5.42)$$

$$\delta = \frac{\Delta \sqrt{n}}{\sigma_\varepsilon} \quad (5.43)$$

$$k = \frac{\delta}{2} \quad (5.44)$$

Note-se que ao contrário do que acontece para as cartas **CUSUM** tradicionais, o valor de  $Z_t$  leva em conta o valor de  $T_L$ , em vez do valor  $\mu$  (média do processo), sendo, por isso, denominada de carta **CUSUM** Modificada. Este valor de  $T_L$  representa o valor máximo de vibração admissível, e é definido

em função dos valores que a norma ISO 2372:2003 estabelece como aceitáveis para o equipamento em estudo,  $(T_L)_N$ , e de um valor de segurança  $\Delta_S$ .

Como os dados são auto-correlacionados, as cartas em questão são construídas com os erros de previsão, por isso, há ainda, a necessidade de transformar o valor de  $T_L$  para a mesma ordem de grandeza. Essa transformação é feita pela subtração da média do processo (estimada na Fase 1),  $\mu$ , obtendo-se por fim o valor de  $T_L$ , dado pela equação (5.42).

A carta “CUSUM Modificada” é construída com base nos valores da variável  $C$ , definindo-se dois tipos de controlo. O primeiro funciona como limite de alerta, designado por  $LA$ , o segundo é o verdadeiro limite de controlo, designado por  $LSC$ .

Estes limites são definidos com recurso aos ábacos desenvolvidos por Gan (1991) apresentados no anexo III, através dos quais se determina o valor de  $h$  e  $h_1$  ( $LA$  e  $LSC$  respectivamente) em função do valor considerado para o  $ARL$  (para cada uma das duas situações) e do valor de referência  $k$ .

Nas equações anteriores considera-se que:

$e_t$	-	valor do erro de previsão no instante $t$
$Z_t$	-	variável Normal reduzida referente a $e_t$
$T_L$	-	valor a partir do qual se considera a intervenção da manutenção
$(T_L)_N$	-	valor de vibração (normalizado)
$\Delta_S$	-	valor de segurança
$\sigma_\varepsilon$	-	desvio padrão dos resíduos, calculado na Fase 1
$n$	-	dimensão da amostra
$h$	-	limite de aviso, $LA$
$h_1$	-	limite de controlo, $LSC$
$k$	-	valor de referência
$\Delta$	-	alteração da média do processo que se deseja detectar

$\delta$  - alteração da média do processo, em número de desvios padrão

➤ **Carta EWMA modificada**

Estas cartas foram desenvolvidas por Roberts (1959) e ainda hoje são objecto de estudo de um grande número de investigadores. A carta EWMA é definida pela variável exponencialmente amortecida,  $E$  definida pela equação (5.45), onde o valor de  $T_L$  é dado pela mesma equação apresentada para as cartas CUSUM (equação 5.44).

Devido ao tipo de estudo em questão, serão levados em conta apenas os desvios positivos para o valor máximo de vibração admissível, ou seja a carta é definida pela linha central e pelo Limite Superior ( $LSC$ ). É ainda considerado o Limite de Aviso ( $LA$ ) tal como na carta CUSUM Modificada.

$$E_t = \max(0, (1-\lambda)E_{t-1} + \lambda(e_t - T_L)) \quad ; \quad E_0 = 0 \quad (5.45)$$

Os limites de aviso e de controlo para esta carta são dados pelas seguintes equações:

$$LA_E = K_1 \sigma_E \quad (5.46)$$

$$LSC_E = K_2 \sigma_E \quad (5.47)$$

em que

$$\sigma_E = \sigma \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}} \quad (5.48)$$

Nas equações anteriores considera-se que:

$E_t$  - média móvel exponencialmente amortecida para o instante  $t$

$\lambda$  - constante de amortecimento,  $(0 \leq \lambda \leq 1)$

$\sigma_E$  - variância da variável  $E$

$K_1, K_2$  - valores determinados em função do valor de  $\lambda$  e do  $ARL$  (para  $LA$  e  $LSC$ )

Deve ressaltar-se o facto de que a construção das cartas CUSUM e EWMA com base nos resíduos implica a substituição do desvio padrão do processo ( $\sigma$ ) pelo desvio padrão dos resíduos ( $\sigma_\varepsilon$ ) ou dos erros de previsão ( $\sigma_{ep}$ ), e a média do processo ( $\mu$ ) por zero (valor esperado dos resíduos e dos erros de previsão).

# Parte II

## Capítulo 6 - Caso de estudo

- 6.1 Introdução
- 6.2 A Marinha Portuguesa e a Escola Naval
- 6.3 Equipamentos utilizados na recolha de dados
- 6.4 Recolha de dados
- 6.5 Metodologia proposta
- 6.6 Análise de Resultados

### 6.1 Introdução

No presente capítulo é feita uma exposição do caso a ser analisado, utilizando as metodologias apresentadas anteriormente, bem como a análise dos resultados obtidos.

Primeiramente é feita uma pequena apresentação da Marinha Portuguesa, tal como uma abordagem às suas necessidades e limitações na área da manutenção.

Apresentam-se várias fotografias que pretendem ilustrar os equipamentos utilizados bem como as metodologias empregues, para que seja possível uma melhor visualização do trabalho efectuado.

Posteriormente são apresentados os resultados obtidos com a aplicação das cartas de controlo aos dados recolhidos e feita uma análise minuciosa dos mesmos.

### 6.2 A Marinha Portuguesa e a Escola Naval

***“Marinha é a garantia da soberania e protecção dos interesses dos portugueses e do Estado, no e pelo mar”*** (Marinha, 2009b).

A Marinha Portuguesa é uma força fundamental na defesa da Fronteira Marítima Portuguesa, apresentando uma história que se confunde de certa maneira com a história de Portugal.

A dimensão e importância desta entidade revela-se, essencialmente, através das três funções fundamentais que desenvolve (Marinha, 2009a):

- Defesa militar e apoio à política externa;
- Segurança e autoridade do Estado;
- Desenvolvimento económico, científico e cultural.

A Marinha Portuguesa está também ligada a várias missões na NATO, o que eleva as exigências no que respeita ao estado operacional dos seus navios, ou seja, exige que se garanta para estes um elevado nível de fiabilidade.

Uma simples revisão num navio representa, no entanto, uma acção de enorme complexidade, não só pelo grande número de sistemas e equipamentos sujeitos a intervenção mas também devido à pequena área disponível para a execução das tarefas de manutenção.

Existe ainda, uma elevada interdependência entre as várias actividades de manutenção, assim como, entre as quatro organizações envolvidas nestes projectos (Arsenal do Alfeite, Direcção de Navios, Direcção de Abastecimento e os Responsáveis do Navio), o que torna a área da manutenção bastante delicada.

As quatro organizações envolvidas na gestão da manutenção dos navios da Marinha Portuguesa têm as seguintes funções (Pinto, 2006):

- Arsenal do Alfeite (AA)

Responsável pelo planeamento, execução e controlo da maioria das actividades de manutenção;

- Direcção de Navios (DN)

Responsável por determinar o âmbito de cada revisão (lista de actividades a desempenhar), contratar o estaleiro e outros fornecedores de serviços e planear, coordenar e controlar o projecto;

- Direcção de Abastecimento (DA)

Responsável pelo aprovisionamento de todos os sobressalentes e consumíveis requisitados pelo estaleiro ou pelo navio;

- Responsáveis do Navio

Responsável por assegurar as condições técnicas, administrativas e de segurança, e por prestar o apoio necessário para a execução das actividades.

A disponibilidade é, frequentemente, afectada pela necessidade de imobilizar o navio, para que se proceda a acções de manutenção planeada, ou por avarias imprevistas que levam à sua paragem.

Numa marinha de dimensão reduzida, como é o caso da Marinha Portuguesa, este indicador torna-se ainda mais crítico devido à escassez de meios.

A estratégia de manutenção que se pratica na Marinha Portuguesa é, maioritariamente, uma política assente na manutenção planeada, apresentando-se no entanto, uma filosofia com elevados encargos, uma vez que requer a substituição de peças sem saber em que fase da sua vida útil se encontram. Há ainda o problema da desactualização dos programas utilizados na manutenção preventiva, uma vez que, são aplicados os mesmos programas em navios novos ou em fim de vida. Outro senão, é o facto de a programação das acções de manutenção ser feita por defeito, isto é, antes do fim de vida útil dos componentes, a fim de garantir que não haverá avaria. Isto resulta em acções de manutenção muito frequentes, intervindo muitas vezes, em equipamentos sem avaria.

Posto isto, muitos têm sido os esforços/estudos, para verificar se uma política de manutenção planeada mas baseada na monitorização da condição dos equipamentos é possível e rentável.

A Escola Naval tem sido, como já se disse, um dos organismos que tem participado nesse esforço, tendo sido a presente dissertação desenvolvida nas suas instalações e com os seus recursos.



**Figura 6.1** Escola Naval situada na Base do Alfeite (Fonte: Marinha, 2010)

### 6.3 Equipamentos utilizados na recolha de dados

Os dados de vibração analisados na parte experimental do presente estudo, foram obtidos utilizando o seguinte material:

- Electrobomba
- Equipamento de medição

### 6.3.1 Electrobomba

Este equipamento, apresentado na Figura 6.2, foi recuperado do depósito de material obsoleto pelo pessoal da oficina de mecânica da Escola Naval, com o propósito de servir de simulador de vibrações.

A base da escolha deste equipamento rotativo, ficou a dever-se à simplicidade do seu funcionamento e à sua grande utilização em ambiente industrial.

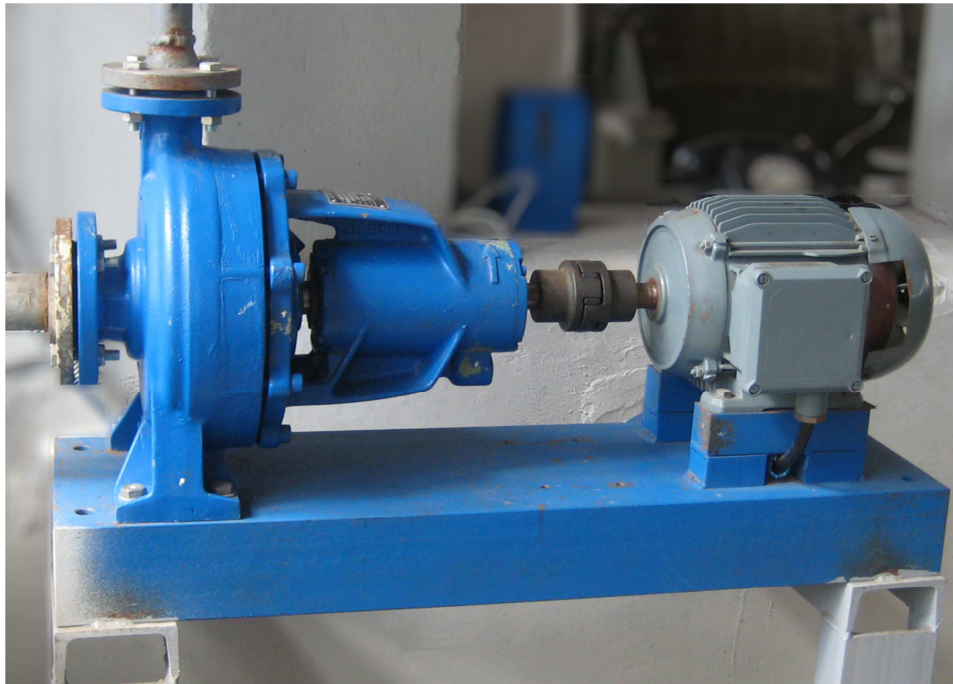


Figura 6.2 Electrobomba

Duas informações relevantes são:

- Velocidade do motor = Velocidade da bomba = 1460 RPM
- Motor eléctrico: potência de 1,5 KW.
- Significa que é possível recorrer à norma ISO 2372:2003, apresentada no capítulo 4.5, para verificar quais os valores de vibração admissível, bem como atestar que se trata de um equipamento da classe I, nas categorias definidas nessa mesma norma, uma vez que o motor eléctrico tem uma potência de 1,5 KW.

### 6.3.2 Equipamentos de medição

Na recolha dos dados de vibração, um dos equipamentos utilizados foi o analisador da condição de equipamentos **CSI 2130** da **Emerson** apresentado na Figura 6.3.





Figura 6.3 Equipamento de medição: CSI 2130 da Emerson

Já no que toca ao transdutor, foi utilizado o acelerómetro A0760GP, Figura 6.4, fixado na electrobomba através de uma base magnética.

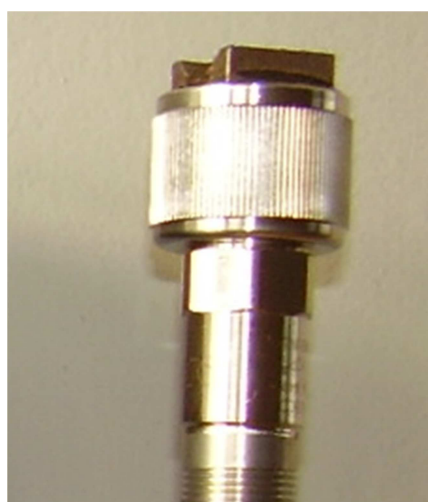


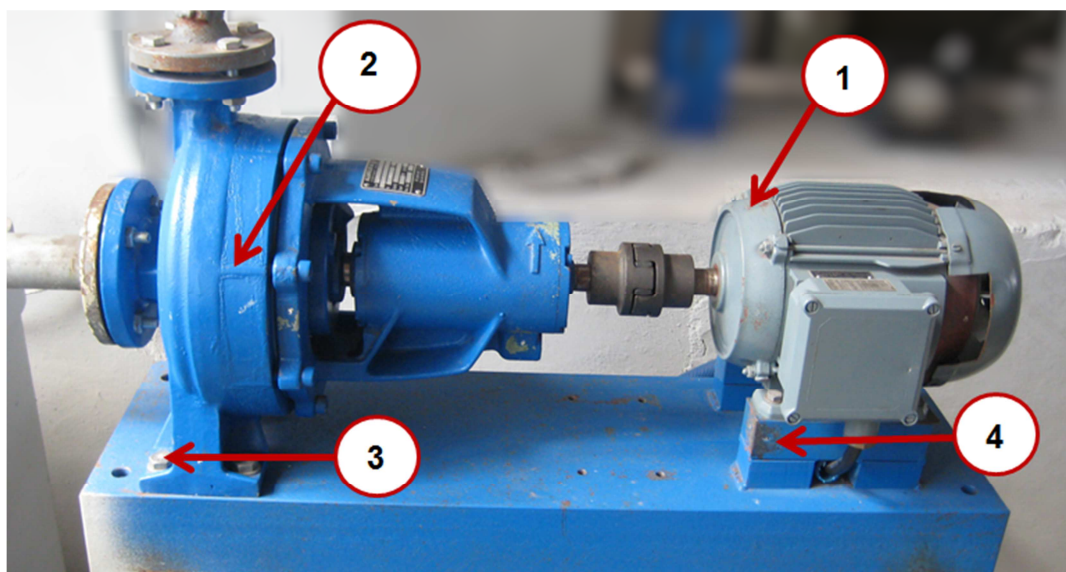
Figura 6.4 Acelerómetro usado na recolha de dados: A0760GP

## 6.4 Recolha dos dados

A utilização do modelo CSI 2130, na medição dos dados vibratórios, implica a elaboração de uma rota de recolha no *software* instalado num computador, que posteriormente é descarregada para o aparelho.

A criação dessas rotas, não faz parte do âmbito deste estudo. Foi utilizada uma rota já existente no aparelho (criada anteriormente para outros estudos de vibrações que utilizaram os mesmos equipamentos).

Foi então estabelecido que os dados seriam recolhidos em quatro pontos da electrobomba representados na Figura 6.5.



**Figura 6.5 Representação esquemática dos pontos de recolha na electrobomba**

Os dados foram recolhidos (como mostra a Figura 6.6) em amostras individuais de 5 em 5 minutos, após o equipamento estar em funcionamento cerca de meia hora (para estabilização). Numa situação real, esta frequência de amostragem não faria sentido, isto é, deveria ser feita com um maior intervalo de tempo entre medições e durante um período mais alargado, para que a degradação resultante da utilização do equipamento fosse detectada.

Sendo um equipamento de teste (em funcionamento apenas durante as medições) não faria qualquer sentido fazer as medições espaçadas no tempo, uma vez que os resultados seriam os mesmos.

Numa primeira fase foram recolhidas 200 amostras com a electrobomba em boas condições de funcionamento. Posteriormente, foram introduzidas quatro perturbações (pretendendo simular a progressividade da degradação do equipamento) recolhendo-se 50 amostras para cada uma das quatro situações.



**Figura 6.6 Processo de recolha de dados**

Após a recolha de dados, estes são transferidos para o computador, e armazenados numa base de dados.

Quando se procede a esta transferência, é possível escolher quais os parâmetros que se pretendem como *output*, bem como as unidades desses mesmos parâmetros.

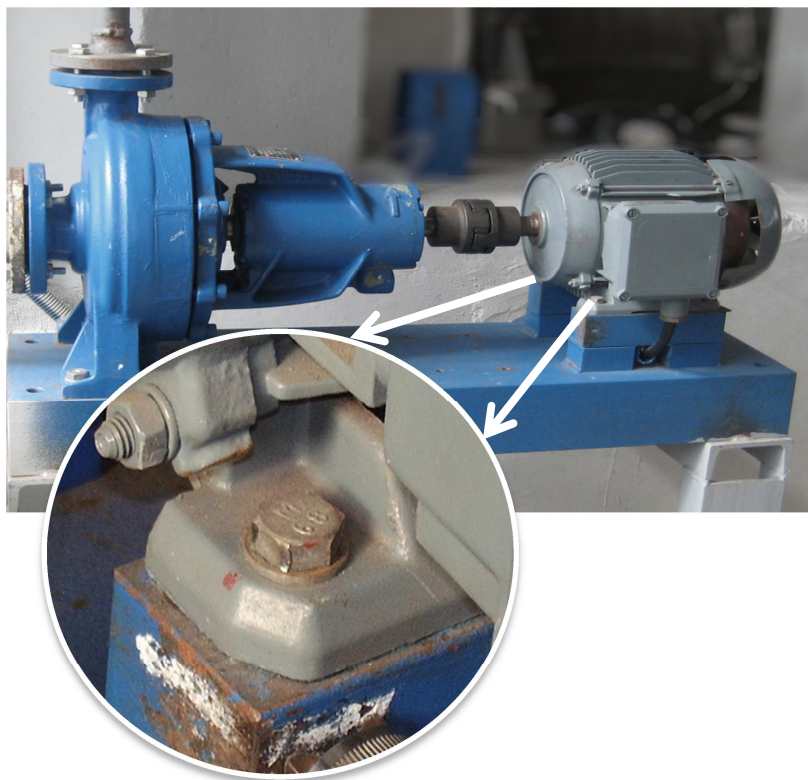
Neste caso escolheu-se, como parâmetro, o nível global da vibração de cada amostra medido em velocidade (mm/s).

#### **6.4.1 Avaria introduzida**

Para averiguar o desempenho, das cartas de controlo, na detecção da degradação de um equipamento, introduziu-se uma avaria no mesmo.

Existem vários tipos de avarias que podem ocorrer num equipamento deste tipo, tendo sido escolhido para este estudo a avaria por **desaperto**.

Foram desapertados os dois parafusos de fixação do motor, identificados na Figura 6.7.



**Figura 6.7 Parafusos que foram desapertados aquando da introdução da avaria**

Na tentativa de reproduzir uma situação real, em que a avaria do equipamento é, geralmente, progressiva no tempo, introduziram-se diferentes perturbações, isto é, começou-se por um pequeno desaperto 1/4 de volta e terminou-se num desaperto de uma volta completa em relação à posição inicial. A representação dos quatro níveis de desaperto ilustra-se na Figura 6.8.



**Figura 6.8 Representação das diferentes perturbações introduzidas na electromomba**

## 6.5 Metodologia proposta

A metodologia que se propõe, para aplicação das cartas de controlo estatístico, para monitorizar a vibração de sistemas reparáveis, é a seguinte:

### FASE 1

- Verificar a independência dos dados recolhidos quando a electrobomba se encontrava sem avarias, através da *FACE* e da *FACPE*;
- Modelar, com recurso aos modelos *ARIMA*, os dados que apresentem auto-correlação;
- Construir as cartas com base nos resíduos,  $e - MR$ , para os pontos que apresentem dados auto-correlacionados (caso os dados sejam independentes, construir as cartas  $X - MR$ ).
- Verificar a estabilidade dos dados recolhidos;
- Verificar a Normalidade dos dados;
- Estimar os parâmetros (média e desvio padrão) da vibração do sistema.
- 

### FASE 2

- Construir as cartas *CUSUM* e *EWMA* Modificadas com base nos erros de previsão para monitorizar o valor da vibração do sistema, recorrendo aos dados obtidos em medições posteriores à introdução das diferentes perturbações.
  - Definir com base na norma ISO 2372:2003 o valor de vibração a partir do qual se deve intervir no sistema,  $(T_L)_N$ .
  - Definir a alteração  $\Delta$  que se pretende detectar no valor médio da vibração do sistema.
  - Estimar os dois limites para controlar o valor médio da vibração, ou seja, o limite de controlo (*LSC*) e o limite de aviso (*LA*).
  - Estabelecer regras de intervenção no sistema.

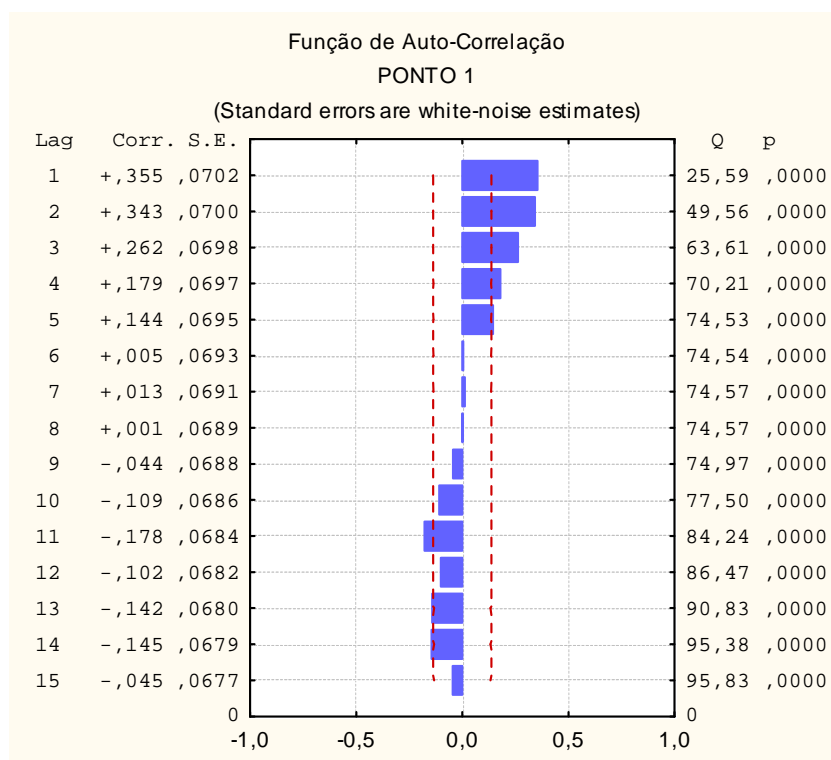
## 6.6 Análise dos Resultados

### 6.6.1 Fase 1 – Estimação dos parâmetros

De seguida, são apresentados os resultados obtidos para o ponto 1, sendo possível consultar os restantes (ponto 2, 3 e 4) no anexo II.

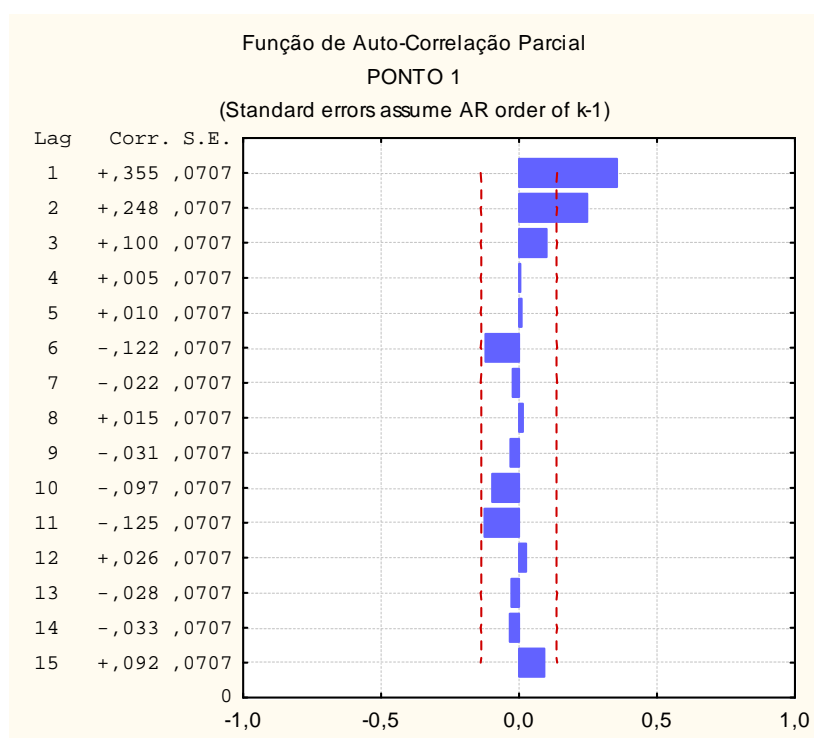
O primeiro passo para a estimação dos parâmetros passa pela verificação da independência dos dados, através da análise da *FACE* e *FACPE*, recorrendo ao *software Statistica*.

As Figuras 6-9 e 6-10 representam, respectivamente, a função de auto-correlação e auto-correlação parcial dos dados recolhidos no ponto 1.



**Figura 6.9 *FACE* referente aos dados do ponto 1**





**Figura 6.10 FACPE referente aos dados do ponto 1**

A análise da *FACE* permite verificar que os dados apresentam auto-correlação significativa uma vez que alguns valores de  $\rho_k$  e  $\phi_{kk}$  se encontram fora do intervalo de confiança respectivo.

De maneira a identificar o modelo que melhor se ajusta aos dados, procede-se à comparação do perfil da *FACE* e da *FACPE* com o da *FAC* e *FACP*, respectivamente. Essa comparação permite dizer que um modelo  $AR(2)$  poderá ajustar-se aos dados.

A estimativa dos parâmetros, obtida através do *Statistica*, do modelo mais adequado, apresenta-se na Tabela 6-1.

**Tabela 6.1 Parâmetros do modelo ajustado ao ponto 1**

$\hat{\xi}$	$\hat{\phi}_1$	$\hat{\phi}_2$
0,248	0,269	0,252

Após a modelação do processo é necessário determinar os resíduos e verificar se estes não apresentam auto-correlação. Para isso, procede-se novamente à análise da *FACE* e da *FACPE*, desta vez, dos resíduos, exibida na Figura 6.11 e 6.12, respectivamente.

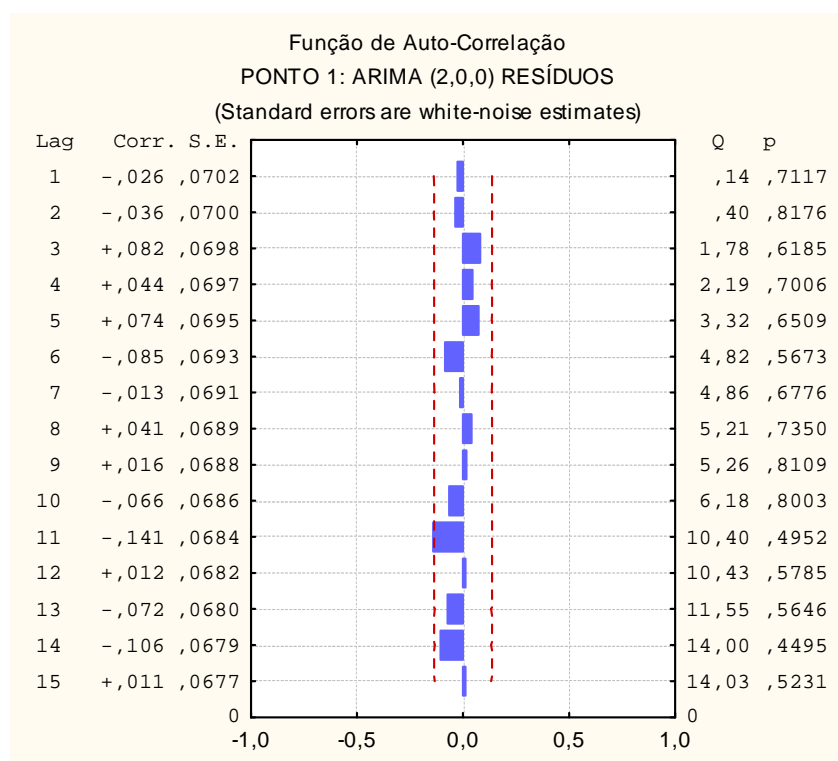


Figura 6.11 FACE dos residuos referentes ao ponto 1

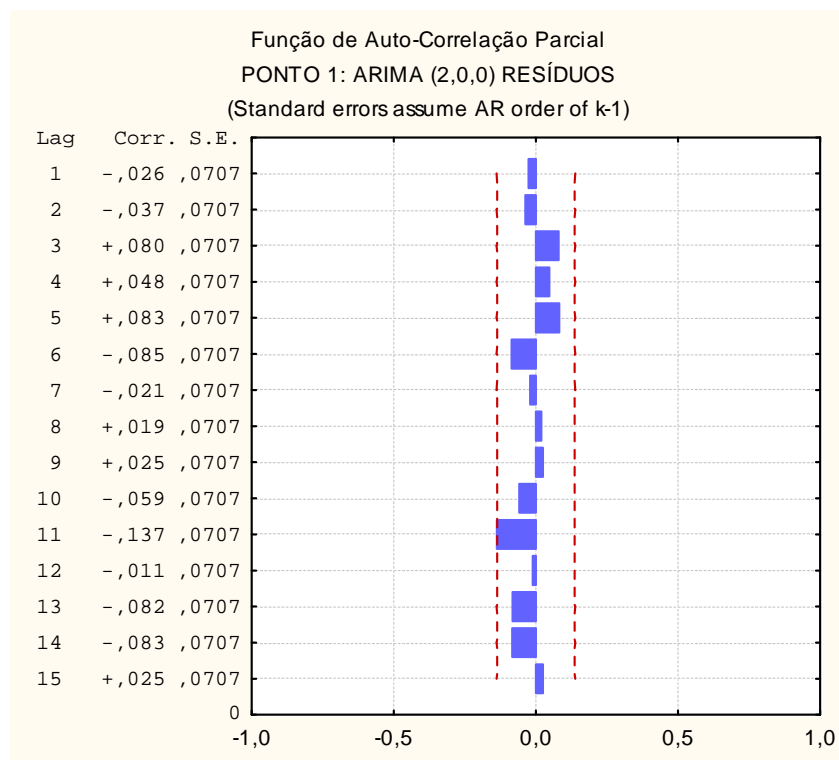


Figura 6.12 FACPE dos residuos referentes ao ponto 1

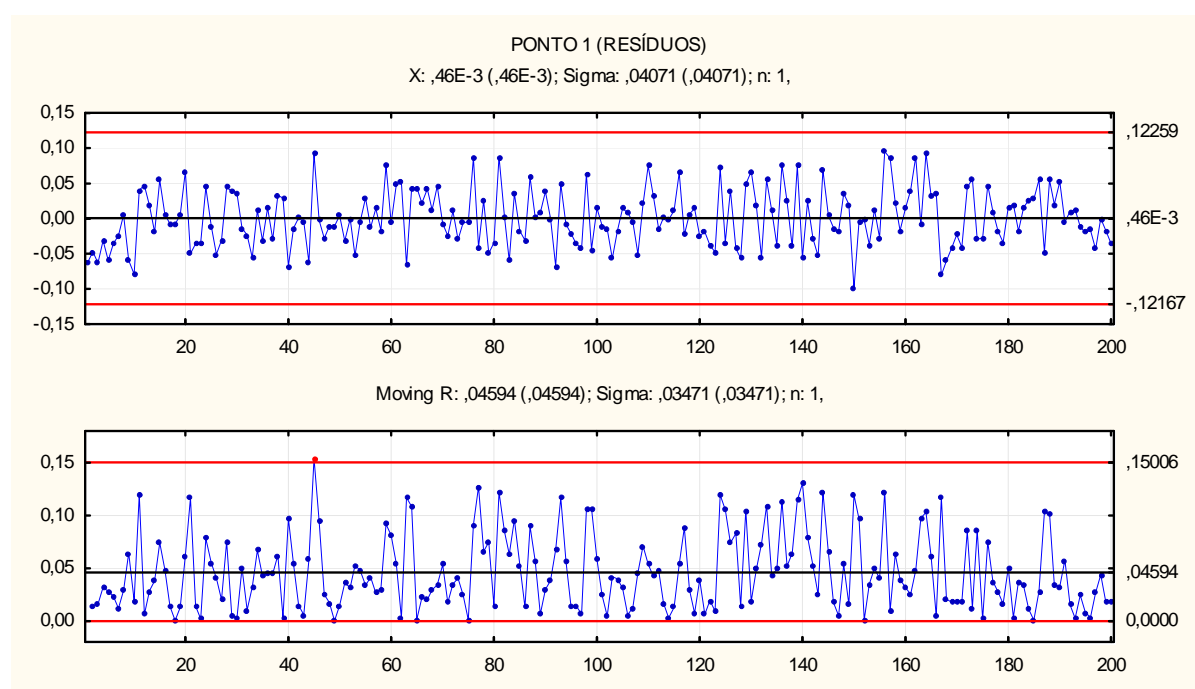


A análise das figuras anteriores mostra que os resíduos são independentes, uma vez que valores dos coeficientes de auto-correlação estimados dos “lag’s” se encontram dentro do intervalo de confiança.

Apresentando, os dados, auto-correlação, as cartas de Shewhart não podem ser directamente aplicadas, construindo-se, nesta situação, as cartas  $e-MR$  (resíduos e amplitudes móveis), resíduos estes resultantes da modelação do processo.

Nas cartas de controlo são analisados os pontos que ultrapassam os limites de controlo. Sendo estas cartas, provenientes dos resíduos, os pontos não devem ser eliminados, mas substituídos pelo valor esperado.

Recorrendo ao *software Statistica*, para o ponto1, obtêm-se as cartas ilustradas na Figura 6.13.



**Figura 6.13 Cartas de controlo  $e-MR$  dos resíduos para o ponto 1**

A análise das cartas apresentadas anteriormente (as amplitudes móveis foram determinadas a partir de dois resíduos consecutivos), mostra a existência de uma causa especial de variação, uma vez que a amostra nº45 se encontra acima do limite de controlo na carta  $MR$ .

Este ponto é substituído pelo seu valor esperado, nesse instante, e procede-se ao reajustamento do modelo *ARIMA*. O estudo da independência dos resíduos é novamente verificada através da análise da *FACE* e da *FACPE*, dos resíduos revistos, apresentadas nas Figuras 6-14 e 6-15 respectivamente.

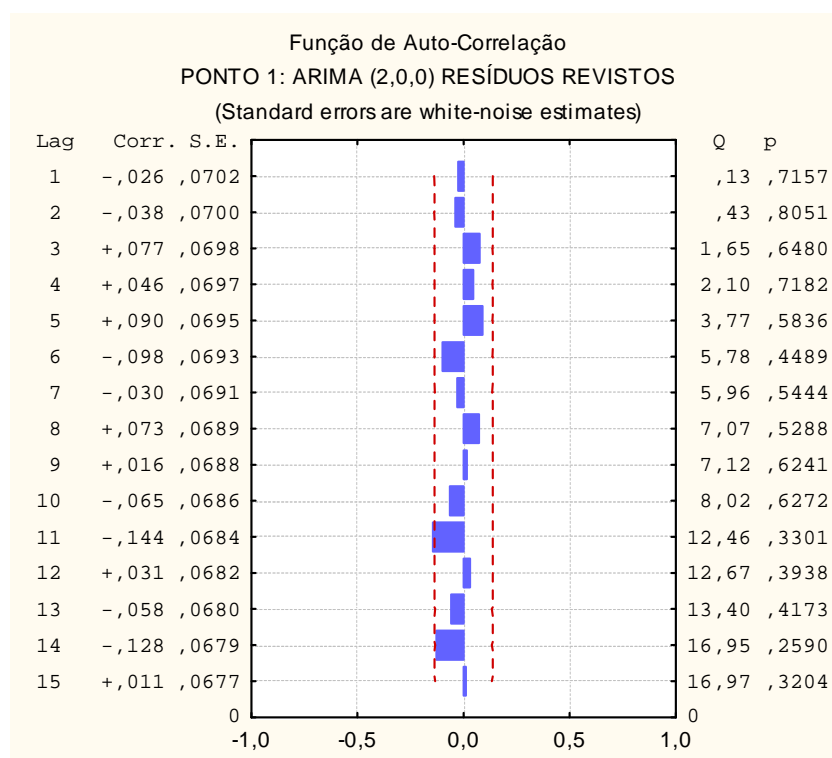


Figura 6.14 FACE dos resíduos revistos referentes aos ponto 1

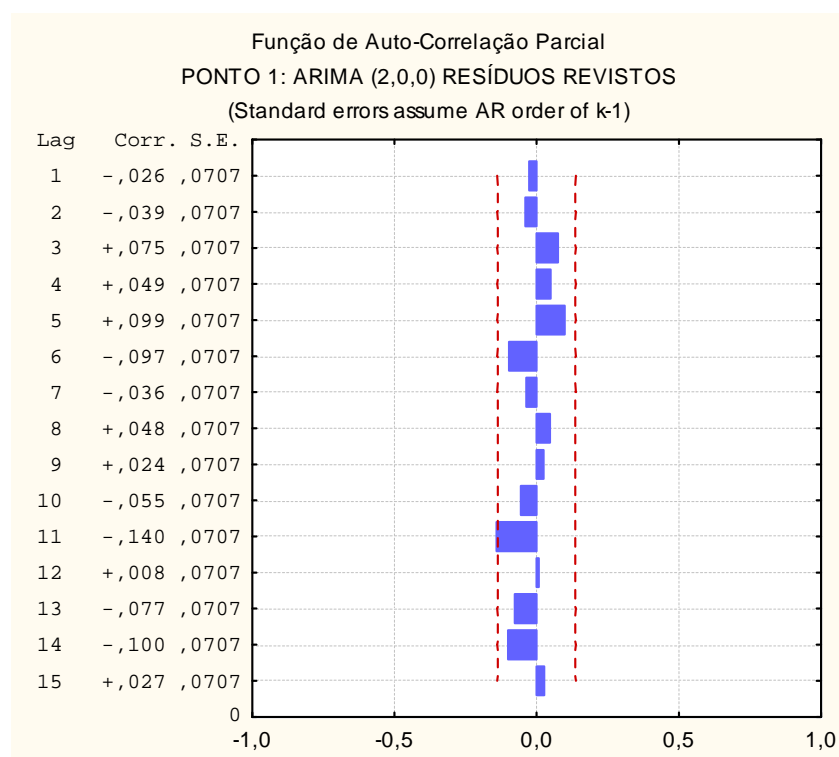
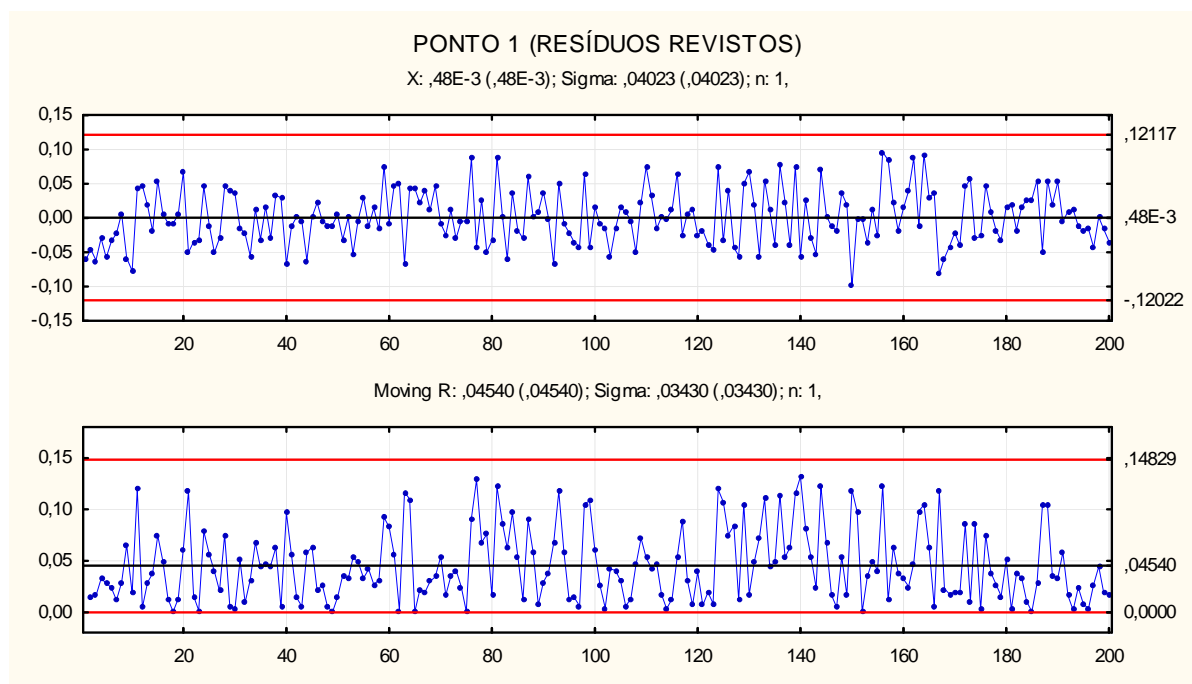


Figura 6.15 FACPE dos resíduos revistos referentes aos ponto 1

São estimados novos parâmetros (Tabela 6-2) e elaborada uma carta de controlo com os novos resíduos, a carta  $e - MR$  revista, Figura 6.16.

**Tabela 6.2 Parâmetros do modelo ajustado ao ponto 1 revisto**

$\hat{\xi}$	$\hat{\phi}_1$	$\hat{\phi}_2$	$\hat{\rho}_1$	$\hat{\rho}_2$
0,240	0,285	0,250	0,376	0,246



**Figura 6.16 Carta de controle  $e - MR$  dos resíduos revistos para o ponto1**

Constata-se que não existem pontos fora dos limites de controle, isto é, a estabilidade dos dados do sistema é atestada.

A Tabela 6-3 resume as das estimativas dos parâmetros dos modelos ajustados aos pontos 2, 3 e 4.

Constata-se que estes pontos, apresentam dados auto-correlacionados, modelados por um modelo auto-regressivo de ordem  $p = 2$ , tal como acontece com o ponto 1.

Tabela 6.3 Resumo dos parâmetros dos modelos ajustados a cada ponto

	Modelo	$\hat{\xi}$	$\hat{\phi}_1$	$\hat{\phi}_2$	$\hat{\rho}_1$	$\hat{\rho}_2$
Ponto 2	AR (2)	0,128	0,513	0,224	0,661	0,222
Ponto 3	AR (2)	0,116	0,449	0,269	0,612	0,267
Ponto 4	AR (2)	0,472	0,116	0,251	0,153	0,246

O passo seguinte, para a estimação dos parâmetros, é o estudo da Normalidade dos resíduos. Este estudo foi realizado através dos testes Kolmogorov-Smirnov ( $d < D_{crit}$  onde  $D_{crit} = \frac{0,886}{\sqrt{N}} = 0,06256$  para  $\alpha = 5\%$  ).

A Figura 6.17 ilustra o histograma obtido com o auxílio do *software Statistica* para os resíduos referentes ao ponto 1.

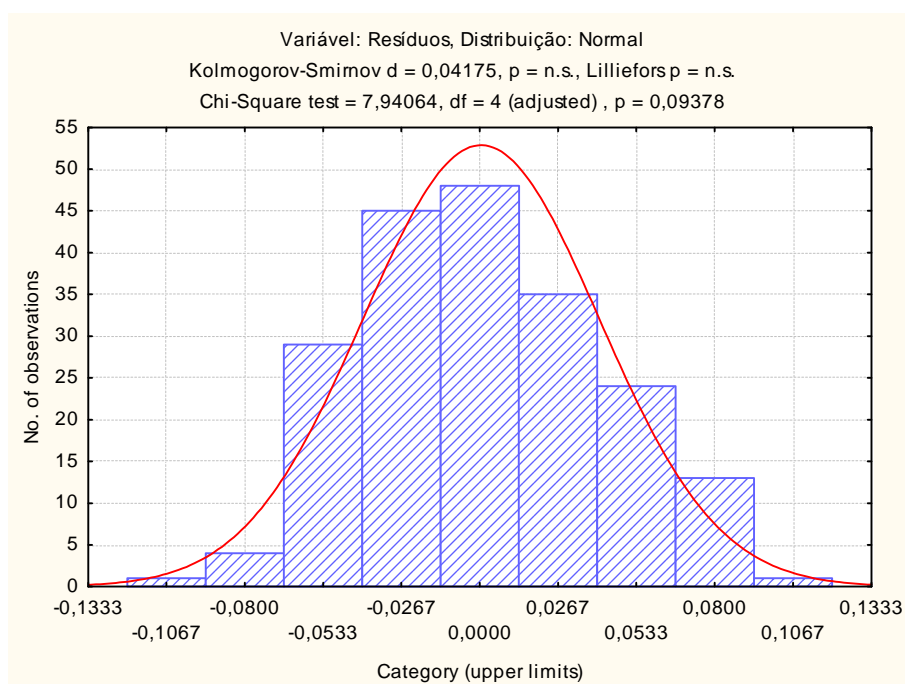


Figura 6.17 Verificação da Normalidade dos resíduos revistos referentes ao ponto 1

De seguida apresenta-se uma tabela resumo dos valores obtidos para os teste de Normalidade, para os quatro pontos, podendo constatar-se que os todos seguem uma distribuição Normal.

**Tabela 6.4 Estudo da Normalidade dos resíduos de cada ponto**

	$d$	$D_{crit}$
Ponto 1	0,04175	0,06256
Ponto 2	0,06039	
Ponto 3	0,05202	
Ponto 4	0,04039	

Finalmente, procede-se à estimação da média e do desvio padrão da vibração do sistema. Uma vez que os dados dos quatro pontos são modelados por um modelo auto-regressivo de ordem dois, recorre-se às expressões (5.26), (5.27) e (5.38) para se obter essas estimativas.

O valor de  $\overline{MR}$  é dado na carta da Figura 6.16 (para o ponto 1) e nas cartas referentes a situações de estabilidade, apresentadas no anexo II, para os restantes pontos.

**Tabela 6.5 Parâmetros estimados para cada ponto**

	$\overline{MR}$	$\sigma_{\varepsilon}$	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
Ponto 1	0,045	0,040	0,517	0,044
Ponto 2	0,035	0,031	0,487	0,040
Ponto 3	0,036	0,032	0,411	0,040
Ponto 4	0,096	0,086	0,746	0,089

### 6.6.2 Fase 2 - Monitorização

Concluída a Fase 1 do SPC, onde se verificou a estabilidade dos dados recolhidos e se estimaram os parâmetros que caracterizam a vibração do sistema, pode iniciar-se a Fase 2.

A Fase 2 tem como objectivo a monitorização da condição do equipamento, sendo para isso, aplicadas as cartas *CUSUM* e *EWMA* Modificadas para os erros de previsão, uma vez que na Fase 1 foi atestada a auto-correlação dos dados.

Para a implementação das cartas *CUSUM* e *EWMA* Modificadas, cujos conceitos são apresentados no capítulo 5.4.3 e 5.4.4, é necessário começar por definir o valor de  $T_L$  a considerar.

Atendendo à norma ISO 2372:2003 apresentada no capítulo 4.5, verifica-se que para um equipamento da classe I (como é o caso da electrobomba que possui uma potência de 1,5KW), existem patamares de valores que indicam se o valor de vibração, a que o equipamento está sujeito, é bom, permitido, tolerável ou inaceitável.

A escolha do valor  $(T_L)_N$ , que permite o posterior cálculo do  $T_L$ , prende-se com o nível de vibração que se está disposto a deixar o equipamento suportar. No presente estudo, escolheu-se o valor de 1,12 mm/s (valor que delimita os patamares permitido/tolerável), mas poderia ter sido escolhido qualquer outro.

Outro parâmetro que entra na definição da expressão do  $T_L$  é o valor de segurança  $\Delta_s$ . A consideração deste valor leva a um estreitamento dos limites, ou seja, que as avarias se detectem mais rapidamente.

Para efeitos de cálculo, na presente dissertação, considerou-se  $\Delta_s = 1\sigma_\varepsilon$ . Mais uma vez este valor relaciona-se com o risco que se está disposto a correr, sendo que quanto maior o valor de  $\Delta_s$  menor é o risco de não se detectar a avaria quando esta ocorre.

Sendo o valor de  $T_L$  definido pela expressão (5.42), verifica-se que para cada ponto, o seu valor será diferente, Tabela 6-6, uma vez que o valor de  $\mu$  é diferente em cada ponto.

**Tabela 6.6 Valores de  $T_L$  para os diferentes pontos**

$T_L$			
Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
0,56	0,60	0,68	0,29

A próxima consideração a fazer é qual a alteração que se pretende detectar com a aplicação deste tipo de cartas.

Definiu-se para este trabalho que se pretendem detectar alterações de  $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$  para todas as perturbações introduzidas, no entanto, no sentido de testar a sensibilidade da carta, para diferentes valores de  $\Delta$ , será feita uma comparação (apenas para a perturbação mais gravosa) dos resultados obtidos quando o  $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ ,  $\Delta = 1\sigma_\varepsilon$  ou  $\Delta = 1,5\sigma_\varepsilon$ .

À semelhança do que acontece com o valor de  $\Delta_s$ , a escolha do valor de  $\Delta$  deve ser feita atendendo ao risco que se está disposto a correr, a nível de detecção da avaria.

Através dos valores de  $\Delta$ , definem-se os valores de  $\delta$ , apresentados na Tabela 6-7, recorrendo à expressão (5.44).

**Tabela 6.7 Valores de  $\delta$  definidos para os diferentes  $\Delta$**

$\Delta$	$0,5 \sigma$	$1 \sigma$	$1,5\sigma$
$\delta$	0,5	1	1,5

Na determinação dos limites das cartas, considerou-se  $\alpha = 1\%$  ( $ARL = 100$ ) na definição do  $LA$  e  $\alpha = 0,2\%$  ( $ARL = 500$ ) na definição do  $LSC$ .

Feitas estas considerações é possível, consultando os ábacos apresentados no Anexo III referentes às cartas *CUSUM*, definir os limites dessas cartas ( $h$  e  $h_1$ ), obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 6-8.

**Tabela 6.8 Limites das cartas *CUSUM* Modificadas**

		$LA(h)$ $ARL = 100$	$LSC(h_1)$ $ARL = 500$
$k$	0,25	5,51	8,5
	0,5	3,5	5,1
	0,75	2,5	3,5

Os ábacos referentes às cartas *EWMA*, exibidos também no Anexo III, permitem obter os valores dos parâmetros  $\lambda$  e  $K$  necessários para o cálculo da variável  $E$ , através da equação (5.45), e dos limites de controlo ( $LA$  e  $LSC$ ) dados pelas equação (5.46) e (5.47) respectivamente.

Tabela 6.9 Valores de  $\lambda$  e  $K$  para as cartas *EWMA* com  $\delta$  e *ARL* pré-estabelecidos

	$\delta$	0,5	1	1,5
<i>ARL</i> = 100	$\lambda$	0,05	0,13	0,25
	$K_1$	2,7	2,9	3
<i>ARL</i> = 500	$\lambda$	0,08	0,18	0,34
	$K_2$	2,1	2,3	2,5

Salienta-se o facto de nas cartas *CUSUM*, o valor dos limites de controlo ser o mesmo para todos os pontos, ao passo que nas cartas *EWMA* este variar de ponto para ponto uma vez que é dependente do valor de  $\sigma_\varepsilon$ .

Falta apenas definir as regras de intervenção no sistema, sendo que este é, tal como alguns dos anteriores, um passo definido empiricamente.

Estabeleceram-se as seguintes regras:

- Proceder a uma intervenção no sentido de despistar alguma situação anómala quando existem **oito pontos** consecutivos acima de *LA*.
- Proceder a uma intervenção de manutenção quando existem **cinco pontos** consecutivos acima de *LSC*.

Estas regras pretendem minimizar os falsos alarmes, uma vez que, nem sempre que ocorre um ponto fora dos limites significa uma situação de avaria.

Levou-se ainda em consideração, no estabelecimento destas regras, o facto do valor da norma que se considerou (1,12mm/s), ser o valor acima do qual deixa de ser permitido, mas ainda tolerável, o funcionamento do equipamento, e ainda o estabelecimento de um valor de segurança  $\Delta_s$ , o que permite alguma “margem”.

Posto isto, com recurso ao *Excel* construíram-se as cartas *CUSUM* e *EWMA* Modificadas para cada ponto.

O estudo da Fase 2 será apresentado mais uma vez para o ponto 1, sendo que os resultados dos restantes pontos encontram-se no Anexo IV.



### 6.6.2.1 Cartas *CUSUM* Modificadas

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos com as cartas *CUSUM* Modificadas, quando introduzidas as quatro perturbações, considerando uma alteração de  $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$ .

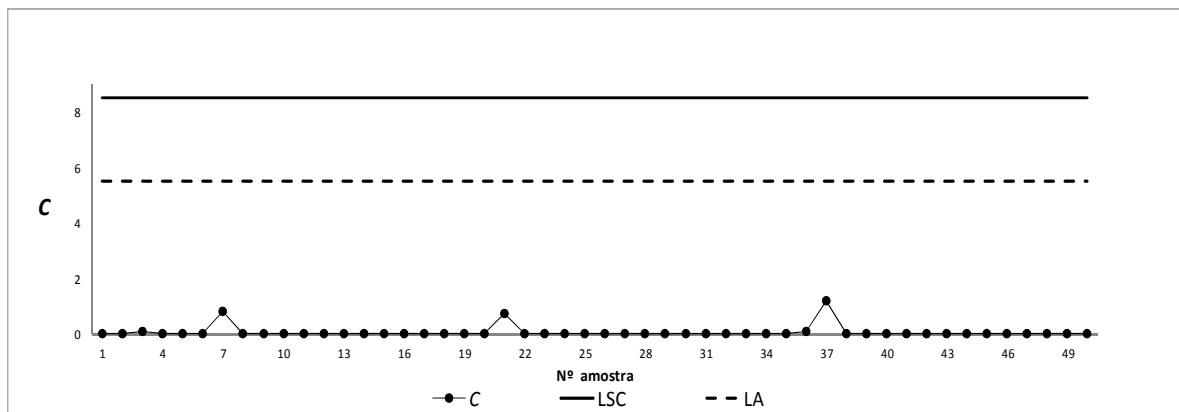


Figura 6.18 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 1) para a 1ª perturbação com  $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$

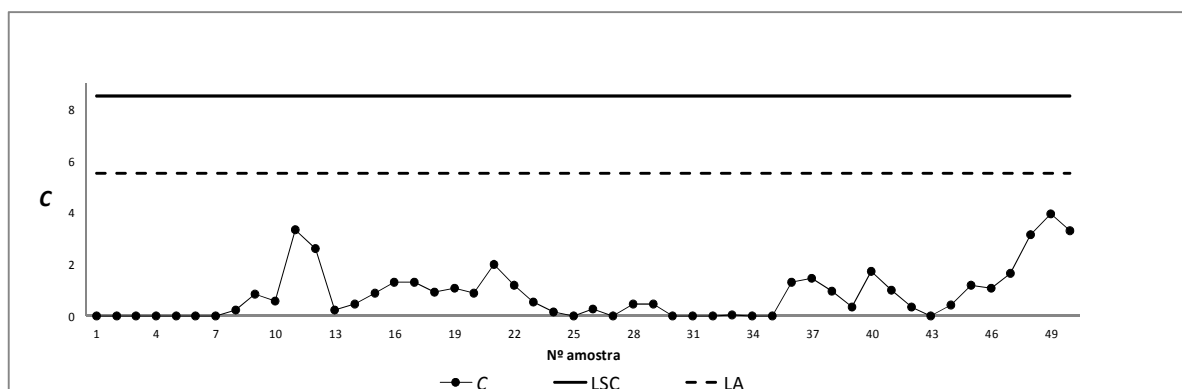


Figura 6.19 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 1) para a 2ª perturbação com  $\Delta = 0,5\sigma_\varepsilon$

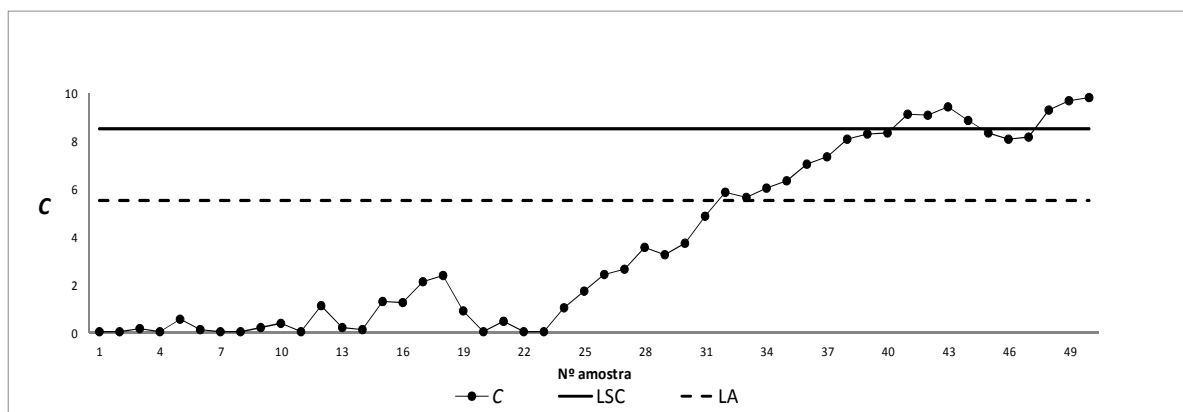


Figura 6.20 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 1) para a 3ª perturbação com  $\Delta = 0,5\sigma_{\varepsilon}$

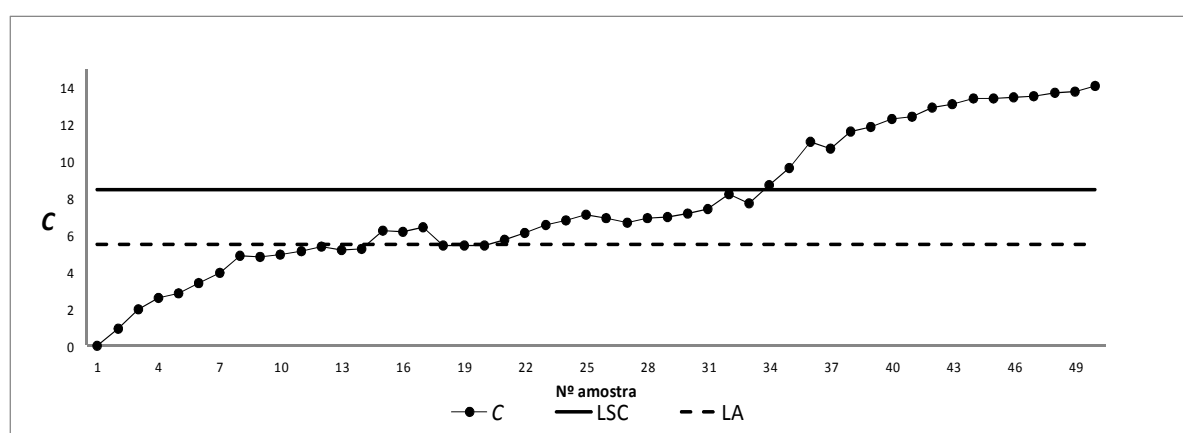


Figura 6.21 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 1) para a 4ª perturbação com  $\Delta = 0,5\sigma_{\varepsilon}$

Analisando os resultados obtidos para cada uma das perturbações introduzidas, verifica-se que quando se introduz a primeira perturbação, praticamente não se detectam quaisquer alterações no valor médio da vibração.

Após meia volta de despertar, começam a surgir algumas alterações na carta, pouco significativas, uma vez que não ultrapassam o limite de aviso.

Para a terceira perturbação, 3/4 de volta, começam a surgir os primeiros pontos acima do *LA* e do *LSC*. Constata-se que a partir da amostra nº32 até à nº50 os pontos se encontram todos acima do *LA*, havendo neste intervalo alguns acima do *LSC* (da amostra nº41 à nº 44 e da nº48 à nº50). Levando em consideração as regras pré-estabelecidas para possíveis intervenções no sistema, justifica-se apenas uma intervenção de despiste aquando da amostra nº39, uma vez que aí se verifica a existência de 8 pontos consecutivos acima do *LA* (apesar de nesta situação existirem pontos acima do *LSC*, não se satisfaz a condição exigida para se proceder a uma intervenção de manutenção).

Quando se introduz a quarta perturbação, cedo se detectam alterações significativas no valor médio das vibrações. A partir da amostra nº8 já existem pontos muito próximos do limite de aviso e após a

amostra nº15 este limite é ultrapassado. Da amostra nº34 à nº50 todos os pontos encontram-se acima do limite superior de controlo, verificando-se a presença de situações que justificam intervenções quer de despiste (amostra nº28) quer de manutenção (amostra nº38).

Atendendo às regras estabelecidas, pela análise do Figura 6.21, deveria ter-se procedido a uma intervenção de manutenção na amostra nº38, no entanto tratando-se de um ensaio, nada se fez, sendo por isso visível uma tendência de aumento até à amostra nº50 (que aqui corresponde a cerca de uma hora de funcionamento do equipamento sob condições de avaria). É expectável que, numa situação real em que as medições fossem efectuadas, por exemplo, diariamente (correspondendo estas 12 amostras a 12 dias), o equipamento já se tivesse danificado, originando uma paragem não programada.

De seguida apresentam-se as duas cartas referentes à quarta perturbação, mas para  $\Delta = 1\sigma_\varepsilon$  e  $\Delta = 1,5\sigma_\varepsilon$ .

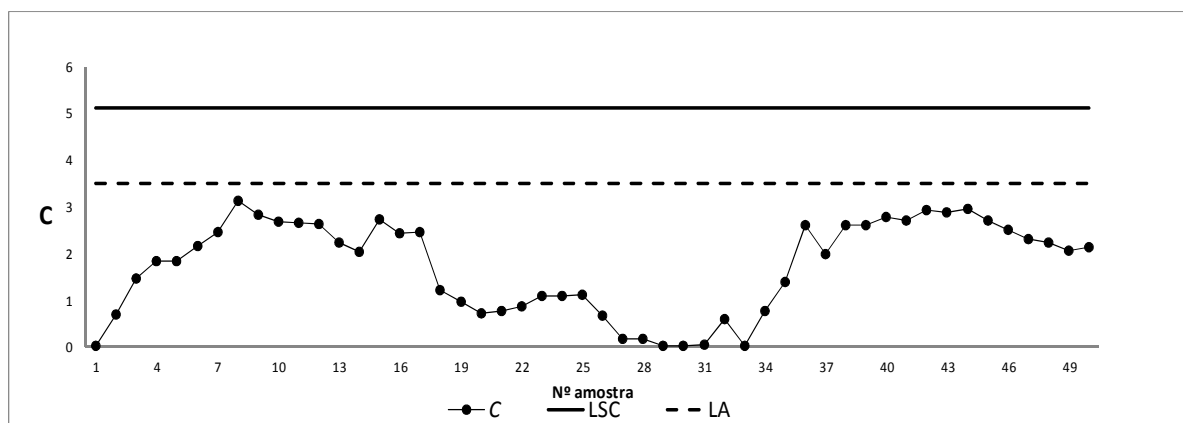


Figura 6.22 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 1) para a 4ª perturbação com  $\Delta = 1\sigma_\varepsilon$

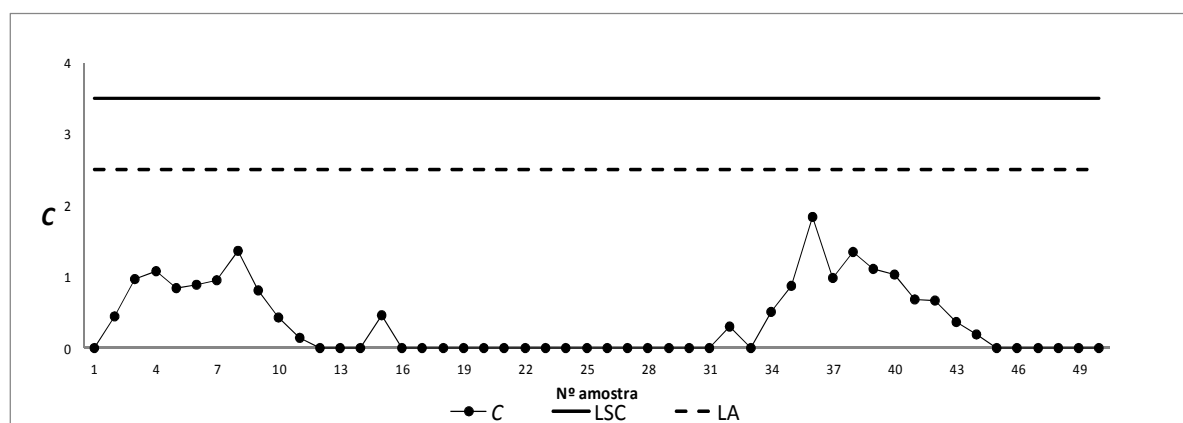


Figura 6.23 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 1) para a 4ª perturbação com  $\Delta = 1,5\sigma_\varepsilon$

Comparando os resultados da Figuras 6-21 com os obtidos nas Figuras 6-22 e 6-23 é possível averiguar a influência de  $\Delta$  na sensibilidade da carta e consequentemente nas conclusões retiradas da sua análise.

Para  $\Delta=1\sigma_\varepsilon$ , Figura 6.22, verifica-se a existência de alterações do valor médio de vibrações, que em alguns pontos, se aproximam bastante do limite de aviso, no entanto sem nunca o ultrapassar.

Para  $\Delta=1,5\sigma_\varepsilon$ , Figura 6.23, surgem apenas algumas alterações, no entanto, pouco significativas uma vez que se encontram bem abaixo do limite de aviso.

### 6.6.2.2 Cartas EWMA Modificadas

De seguida apresentam-se os resultados obtidos com as cartas *EWMA* Modificadas, quando introduzidas as quatro perturbações, considerando uma alteração de  $\Delta=0,5\sigma_\varepsilon$ .

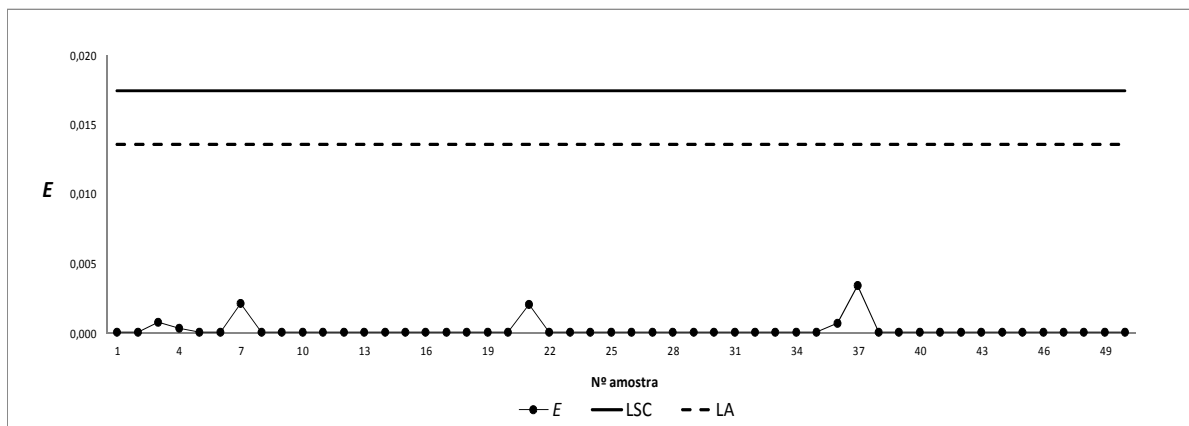


Figura 6.24 Carta *EWMA* Modificada (ponto 1) para a 1ª perturbação com  $\Delta=0,5\sigma_\varepsilon$

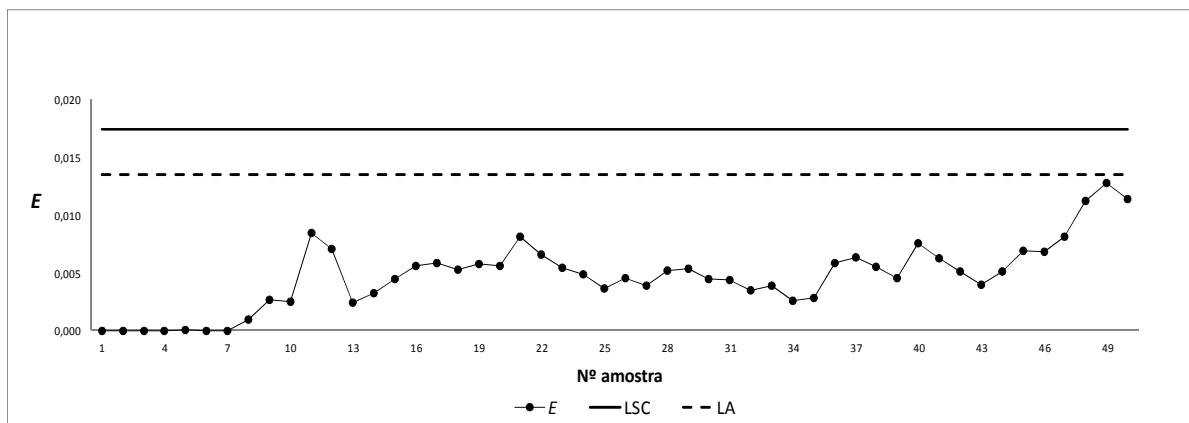


Figura 6.25 Carta *EWMA* Modificada (ponto 1) para a 2ª perturbação com  $\Delta=0,5\sigma_\varepsilon$

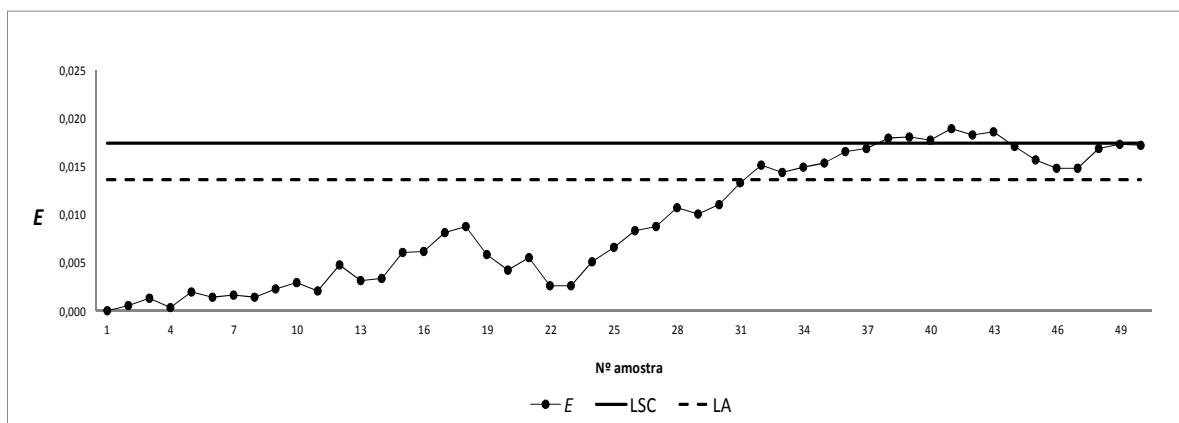


Figura 6.26 Carta *EWMA* Modificada (ponto 1) para a 3ª perturbação com  $\Delta=0,5\sigma_{\varepsilon}$

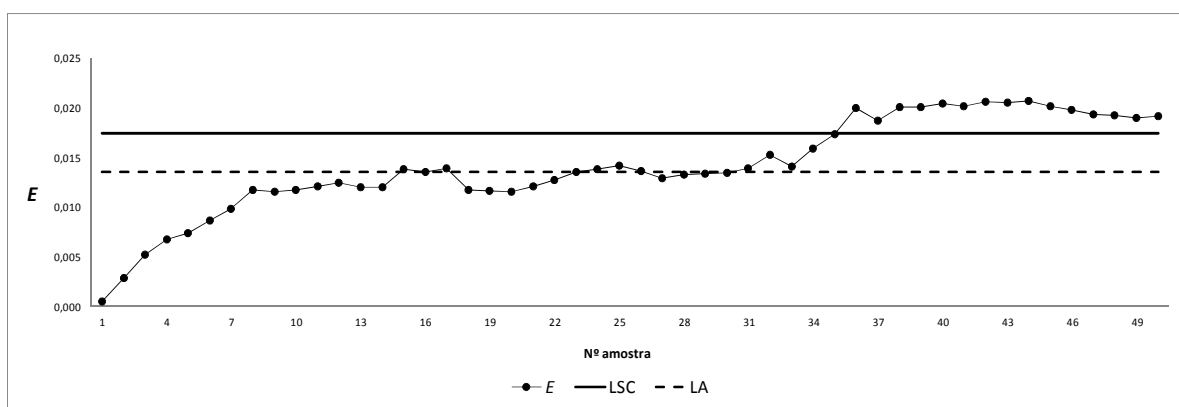


Figura 6.27 Carta *EWMA* Modificada (ponto 1) para a 4ª perturbação com  $\Delta=0,5\sigma_{\varepsilon}$

Analogamente ao que acontece nas cartas *CUSUM* Modificadas, para as duas primeiras perturbações, as cartas *EWMA* Modificadas não detectam alterações significativas no valor médio da vibração.

Na carta *EWMA* Modificada, obtida para a terceira perturbação, surgem seis pontos acima do *LSC*, o que indica a necessidade de uma intervenção de manutenção, aquando da amostra nº42. Atesta-se uma diferença em relação à carta *CUSUM* Modificada, onde apenas surgem situações que indiciam a necessidade de intervenções de despieste.

Relativamente à quarta perturbação os resultados obtidos são similares para as cartas *EWMA* Modificada e *CUSUM* Modificada.

Mais uma vez, procede-se à comparação dos resultados obtidos com diferentes valores de  $\Delta$ , para os dados relativos à situação mais gravosa.

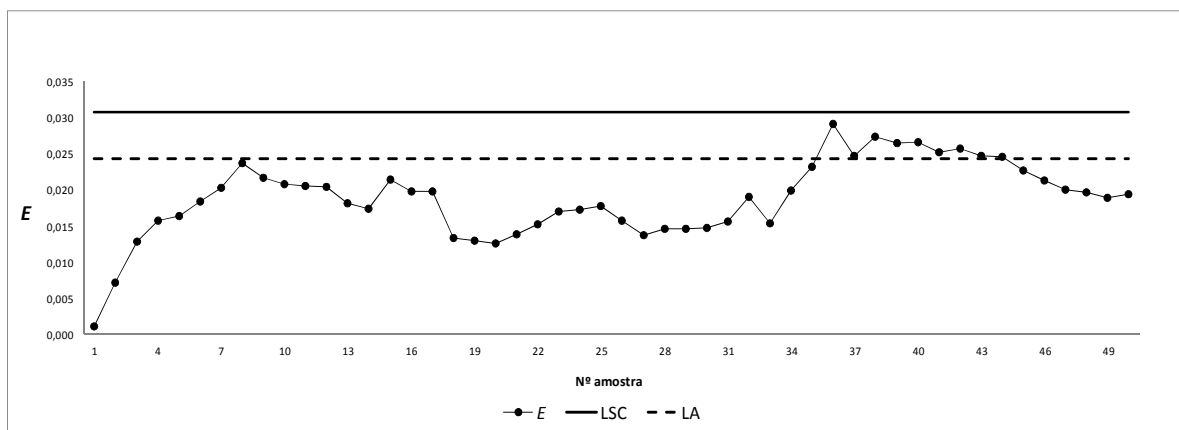


Figura 6.28 Carta EWMA Modificada (ponto 1) para a 4ª perturbação com  $\Delta = 1\sigma_{\varepsilon}$

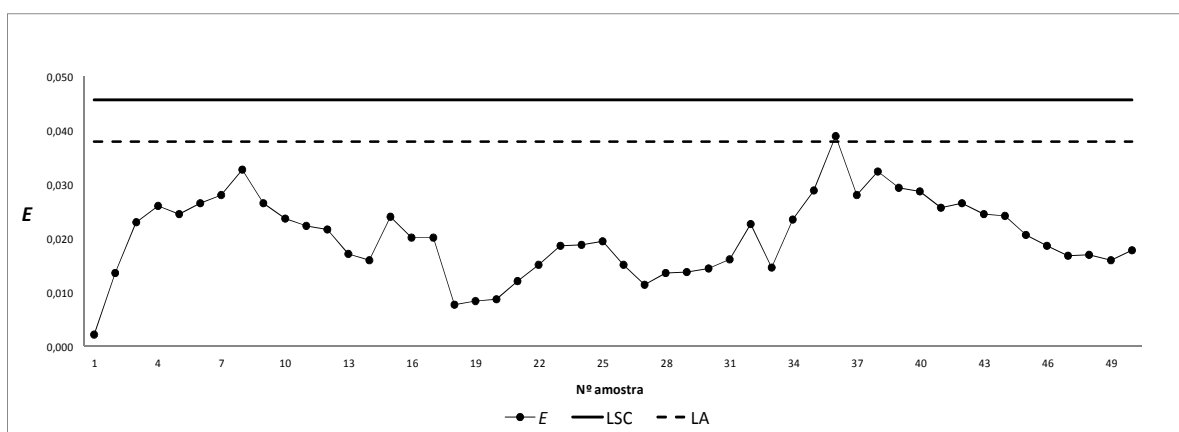


Figura 6.29 Carta EWMA Modificada (ponto 1) para a 4ª perturbação com  $\Delta = 1,5\sigma_{\varepsilon}$

Comparando os resultados obtidos, constata-se uma pequena diferença em comparação com os resultados da *CUSUM* Modificada, pois para uma alteração de  $\Delta = 1\sigma_{\varepsilon}$ , na carta EWMA Modificada, encontra-se uma situação de 8 pontos consecutivos acima do LA, justificando-se por isso, uma intervenção de despiste (amostra nº43).

No que respeita a  $\Delta = 1,5\sigma_{\varepsilon}$ , apesar de se detectarem algumas alterações, estas não se mostram muito relevantes.

Pode concluir-se que, tal como acontece nas cartas *CUSUM* Modificadas, nas cartas EWMA Modificadas, a escolha do valor de  $\Delta$  é fundamental, uma vez que afecta bastante os resultados obtidos.

É possível fazer uma análise análoga aos resultados obtidos para os restantes pontos, verificando-se que os resultados são também similares, isto é, para a primeira e segunda progressão não se

detectam valores acima do  $LA$  (á excepção da carta EWMA Modificadas para o ponto 4, mas como são apenas 4 pontos não justificam qualquer intervenção).

Para a terceira progressão surgem as primeiras variações significativas, isto é, com valores acima do  $LA$  que justificam intervenções de despiste, sendo ainda detectado nas cartas CUSUM Modificadas, no ponto 4, uma situação de 5 pontos consecutivos (amostra nº38 à nº43) acima do  $LSC$ , justificando-se, por isso, uma intervenção de manutenção.

No que se refere aos resultados obtidos para a quarta progressão, de uma maneira geral as alterações da média das vibrações começaram a ser detectadas logo a partir das primeiras amostras, sendo que em todas as cartas se detectou a necessidade de intervenções ou de despiste ou de manutenção.

De ressaltar que, analisando de uma forma geral os resultados obtidos para os quatro pontos, é no ponto 4 que as vibrações se fazem sentir de uma maneira um pouco mais severa. Isto, certamente, estará relacionado com o facto de este ponto ser o mais próximo do local onde foram introduzidas as várias perturbações.

### 6.6.3 Discussão dos resultados

Neste capítulo foram aplicadas as diversas técnicas abordadas anteriormente. O estudo prático iniciou-se com a análise da independência dos dados dos quatro pontos, procedendo-se posteriormente à sua modelação através do modelo *ARIMA* mais adequado e à estimação dos seus parâmetros. De seguida, foi iniciada a monitorização da condição do equipamento, face a perturbações introduzidas, recorrendo às cartas CUSUM e EWMA Modificadas.

Na utilização desta metodologia, há que ressaltar alguns pontos, que se mostram extremamente influentes nos resultados obtidos.

A escolha do valor de  $T_L$  (mais especificamente dos parâmetros que o caracterizam  $(T_L)_N$  e  $\Delta_s$ ), bem como a definição da alteração média que se pretende detectar,  $\Delta$ , é determinante para os resultados. Já o estabelecimento das regras, que determinam quando e que tipo de intervenções são necessárias, apresenta influência na análise desses mesmos resultados.

É imprescindível fazer uma análise de risco, na qual é considerada a criticidade do equipamento em causa, e a partir daí, estabelecer os valores desses factores. Deve levar-se em consideração que os principais objectivos da monitorização da condição são a antecipação das avarias, de modo a evitar paragens não programadas, e simultaneamente diminuir as intervenções desnecessárias. Perante isto, há que ter o cuidado de não estabelecer parâmetros que tornem os limites de controlo demasiado estreitos ou demasiado alargados, traduzindo os resultados obtidos em falsos alarmes (resultando daí inúmeras intervenções desnecessárias) ou em avaliações positivas da condição do equipamento quando este está na realidade degradado.

Parte desta metodologia assenta em considerações empíricas, o que torna determinante para o seu sucesso, o conhecimento do equipamento em si e do sistema global em que se insere.

As cartas *CUSUM* e *EWMA* Modificadas apresentam grande simplicidade de aplicação e de interpretação, sendo essa característica uma mais-valia, uma vez que torna os seus resultados claros.

Quando se analisa a influência de  $\Delta$  na sensibilidade das cartas (na quarta perturbação), verifica-se que estas são muito mais sensíveis quando o  $\Delta$  é menor. É no entanto visível, que as cartas *EWMA* Modificadas são um pouco menos sensíveis à variação desse valor, isto é, quando se testam os vários valores de  $\Delta$ , apesar de existirem diferenças significativas nos resultados obtidos em qualquer umas das cartas (note-se que a avaria deixar de ser detectada para  $\Delta = 1,5\sigma_\epsilon$ ), essa drástica redução de sensibilidade é mais sentida nas cartas *CUSUM* Modificadas.

Outra conclusão pertinente é a escolha dos pontos de medição. Ao proceder à comparação dos resultados obtidos para os diferentes pontos, reconhece-se uma situação muito mais gravosa para o ponto 4, comparativamente, por exemplo, com o ponto 2. Isto realça a ideia de que há necessidade do conhecimento prévio das avarias mais comuns do equipamento em questão, para que os dados sejam recolhidos o mais próximo possível desses pontos críticos.

O aumento da degradação do equipamento, notado, principalmente, para a terceira e quarta perturbação (motivado pela falta de intervenções de manutenção) permite uma avaliação do evoluir do estado da condição do equipamento, possibilitando que as intervenções possam ser programadas para alturas mais indicadas.



# Parte III

## Capítulo 7 - Conclusões e trabalhos futuros

### 7.1 Conclusões Gerais

### 7.2 Sugestões para trabalhos futuros

### 7.1 Conclusões gerais

Uma análise à actual situação económica que o mundo atravessa, mostra por si só, as grandes exigências com que as organizações se deparam para sobreviver no mercado vigente. Os actuais padrões de concorrência levam a que sejam necessárias alterações a nível interno nas organizações, que permitam melhorias contínuas nos serviços, por forma a estabelecer elevados padrões de qualidade e alcançar o imperativo que é a satisfação do cliente.

Perante este cenário, depreende-se a importância que a área da manutenção assume dentro dessas organizações, bem como o crescente interesse pela manutenção condicionada no sentido de minimizar os desvios nos objectivos estabelecidos, motivados por avarias em equipamentos que resultam em paragens não programadas.

A necessidade de conhecer o real estado de condição dos equipamentos, levou ao desenvolvimento de técnicas (que envolvem um conjunto de *hardwares*, muitas vezes de elevada complexidade), das quais se podem realçar, a termografia, ultra-sons, análise de vibrações entre outras. Também os *softwares*, para monitorização da condição, são cada vez mais comuns, mais sofisticados e com maior usabilidade.

O acelerado desenvolvimento das áreas tecnológicas, obriga a um alerta contínuo por parte das organizações que pretendam fazer parte do mercado actual, para que possam tirar o máximo partido desses progressos, nomeadamente na área da detecção de avarias.

A implementação de um programa de monitorização da condição requer um estudo prévio, para a definição dos equipamentos a controlar (escolha baseada na sua importância e no impacto da sua avaria na fiabilidade do sistema global), bem como a frequência com esse controlo é efectuado, no sentido de garantir que serão conseguidos resultados fiáveis e úteis para a organização.

Uma questão importante a levar em consideração aquando da definição dos locais de medição, é o conhecimento do histórico dos equipamentos que serão monitorizados. É fundamental conhecer as avarias mais frequentes tal como o seu impacto, para que a estipulação dos limites aceitáveis para esse equipamento seja feita de forma mais realista, e seja possível direccionar as medições para pontos o mais próximo possível dos elementos susceptíveis de sofrer avarias. No estudo aqui apresentado é perceptível a importância destas considerações, visto que, as vibrações não se fazem sentir da mesma forma, em todos os pontos do equipamento e os limites impostos são determinantes na obtenção de resultados credíveis.

O estudo realizado exhibe ainda outro aspecto de extrema importância no que toca à monitorização da condição, conseguido com o recurso ao SPC, que se prende com a análise de tendências, permitindo a identificação de alterações progressivas num determinado período de tempo. A aplicação do SPC requer, no entanto, algumas considerações fundamentais para que os resultados sejam fiáveis, isto é, a aleatoriedade, Normalidade e independência dos dados devem ser estudadas e, quando não verificadas, contornadas através das metodologias apropriadas.

As cartas de controlo *CUSUM* e *EWMA* Modificadas, apresentadas no presente trabalho, revelam-se excelentes técnicas a usar no estudo da condição de um equipamento uma vez que permite a detecção das avarias bem como a sua degradação ao longo do tempo, possibilitando desta forma a elaboração de planos de manutenção. Apesar de os resultados não se revelarem iguais nos dois tipos de cartas, apresentam-se bastante semelhantes, pelo que não se sugere a aplicação de uma delas em detrimento da outra.

Na aplicação destas metodologias, verifica-se a enorme relevância da escolha do valor dos parâmetros  $(T_L)_N$  e  $\Delta_S$  bem como do valor de  $\Delta$  (alteração da média que se pretende detectar), uma vez que a escolha acertada destes valores é preponderante para que a avaliação feita ao estado de condição dos equipamentos seja o mais realista possível. A escolha destes parâmetros deve reflectir o risco que se está disposto a correr, risco que deve ser definido em função da criticidade do equipamento em causa.

Sendo este trabalho desenvolvido nas instalações da Escola Naval, com o objectivo de contribuir para melhorias consideráveis na área da manutenção dos navios da Marinha Portuguesa, pode concluir-se que a aplicação de um programa de análise de vibrações como método de monitorização de condição dos equipamentos traria grandes vantagens para esta organização, relativamente à manutenção sistemática adoptada actualmente. Esta organização, que cede grande parte da sua verba anual para a manutenção, poderia conseguir uma redução desses valores, bem como um aumento na fiabilidade dos seus equipamentos.

As conclusões aqui retiradas podem ser extrapoladas para a monitorização de equipamentos com qualquer tipo de sinal (vibrações, temperaturas, pressões) onde seja possível estabelecer níveis de *LA* e *LSC*.

Para obter sucesso numa filosofia de manutenção é fundamental a sua integração com outras áreas dentro da organização. A criação de “uma boa comunicação”, por exemplo, com a Qualidade e a Produção, permite que estas se complementem e se fortaleçam. A condição de um equipamento pode ser indirectamente verificada através das anomalias dos produtos fabricados e a definição da altura certa para intervir, evitando paragens dispendiosas e sobrecarga de trabalho.

É crucial não esquecer a necessidade de garantir que o tempo e esforço financeiro, despendidos pela organização, sejam justificáveis face aos resultados obtidos.

## 7.2 Sugestões para trabalhos futuros

A presente dissertação aborda a implementação do controlo estatístico, como método de análise de vibrações, na monitorização da condição de equipamentos/componentes dos navios da Marinha Portuguesa. Este deve, no entanto, ser um trabalho contínuo, que deve ser aperfeiçoado, desenvolvendo novas metodologias e aplicando novas técnicas, nomeadamente para o tornar menos empírico.

No presente trabalho, devido à ausência de dados recolhidos em equipamentos com funcionamento contínuo, e à falta de tempo para os recolher, utilizou-se um equipamento de teste, no qual a sua degradação progressiva foi simulada. Sugere-se que seja definida uma política de recolha de parâmetros sistemática, nomeadamente nos equipamentos que já possuem sistemas de recolha *online*, para construir uma base de dados com dados reais, procedendo-se à aplicação destas metodologias para a monitorização da sua condição.

A construção de cartas de controlo, com recurso ao nível global de vibração permite diagnosticar avarias, no entanto não permite inferir nada acerca do tipo de avaria em questão. Por conseguinte, sugere-se o estudo da possibilidade de aplicar as cartas de controlo para efectuar uma análise espectral de forma a detectar a presença de diferentes tipos de avaria, que tal como se disse anteriormente, surgem mediante diferentes padrões de vibração.

Apesar da monitorização da condição, através da análise de vibrações, ser uma das técnicas mais versáteis, e como tal mais utilizada, mostra-se insuficiente em determinadas análises de condição, visto que, alguns equipamentos são melhor caracterizados com parâmetros como a pressão ou temperatura. Sugere-se o estudo da aplicação do controlo estatístico multivariado na monitorização da condição, com recurso a cartas  $T^2$  Modificadas assim como cartas *MCUSUM* e *MEWMA* Modificadas, conseguindo-se desta forma, a monitorização de várias variáveis em simultâneo.

## **Bibliografia**

- Agency**, I. A. (2000). "Liquid penetrant and magnetic particle testing at level 2". Austria: IAEA.
- Al-Najjar**, B. (1992). "On the selection of condition based maintenance for mechanical systems". In K. Holmberg, A. Folkesson, *Operational Reliability and Systematic Maintenance*. Elsevier Science. pp. 153-173.
- Alwan**, L. C., Roberts, H. V. (1988). Time-series modeling for statistical process control. *Journal of Business & Economic Statistics*, pp.87-95.
- Assis**, R. (2004). "Apoio à decisão em gestão da manutenção: fiabilidade e manutibilidade". Lisboa: Lidel - Edições Técnicas, Lda.
- Box**, G. M., Jenkins, G.M., Reinsel, G. C. (2008). "Time series analysis - forecasting and control". (4th ed.). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Brandt**, A. (2011). "Noise and vibration analysis: signal analysis and experimental procedures". United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Cabral**, J. P. (2009). "Gestão da manutenção de equipamentos, instalações e edifícios". Lisboa: LIDEL.
- Carnero**, M. C. (2003). "Selection of diagnostic techniques and instrumentation in a predictive maintenance program". A case study. *Decision Support Systems*, Vol. 38, pp. 539 – 555.
- Concu**, G., De Nicolo, B., Pani, L. (2011). "Non destructive testing as a tool in reinforced concrete buildings refurbishments".Italy: *Structural Survey*,Vol. 29, pp. 147-161.
- Cox**, M. A. (2009). "Control charts for monitoring observations from a truncated normal distribution". *The journal of risk finance*, Vol. 10, pp. 288-304.
- Dhillon**, B. (2002). "Engineering maintenance: a modern approach". Florida: CRC Press LLC.
- Dias**, J. M., Requeijo, J. R. e Pereira, Z. L. (2009). "Monitorização do estado de condição dos sistemas reparáveis" in: *Riscos Industriais e Emergentes*; C. Guedes Soares, C. Jacinto, A.P. Teixeira, P. Antão (Eds), Edições Salamandra, Lisboa, (ISBN 978-972-689-233-5), Vol.1, pp. 501-512.

## Bibliografia

- Gan, F. F.** (1991). "An optimal design of CUSUM quality charts control". *Journal of Quality Technology*, Vol. 23, pp. 279-286.
- Gomes, P. J.** (2004). "A Evolução do conceito de qualidade: dos bens manufacturados aos serviços de informação". *Associação Portuguesa de Bibliotecários Arquivistas e Documentalistas - Cadenos BAD*, Vol. 2, pp. 6-18.
- Gonçalves, A. C., Cunha, R. C., Lago, D. F.** (2007). "Vibration and wear particles analysis in a test stand". *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 59, pp. 209-216.
- Harris, C. M.** (2002). "Harris' shock and vibration handbook". (5th ed.). McGraw-Hill.
- ISO 2372:2003.** "Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/sec - basis for specifying evaluation standards".
- Kardex, A., Nascif, J.** (2009). "Manutenção - função estratégica". (3ª ed.). Rio de Janeiro: Qualitymark.
- Kelly, S. G.** (2000). "Fundamentals of mechanical vibrations". USA: McGraw-Hill.
- Mast, J. d.** (2008). "A history of industrial statistics and quality and efficiency improvement". In S. Coleman, T. Geenfield, D. Stewardson, D. C. Montgomery, *Statistical practice in business and industry*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, pp. 15-27.
- Mobius Institute.** (2005). "Manual do curso técnico "analista de vibrações - categoria II". Lisboa: SPECMAN.
- Mobley, R. K.** (2002). "An introduction to predictive maintenance". (2nd ed.). USA: Elsevier Science.
- Mobley, R. K.** (2004). "Maintenance fundamentals". (2nd ed.). Oxford: Elsevier Inc.
- Mobley, R. K., Higgins, L. R., Wikoff, D. J.** (2008). "Maintenance engineering handbook". (7th ed.). USA: MacGraw-Hill.
- Montgomery, D. C.** (2009). "Introduction to Statistical Quality Control". (6th ed.). New York: Wiley & Sons.
- Montgomery, D. C., Runger, G. C.** (2006). "Applied statistics and probability for engineers". (4th ed.). New York: John Wiley & Sons.

**NP 4483:2008.** "Sistemas de gestão da manutenção". Caparica: IPQ.

**NP EN 13306:2007.** "Terminologia da manutenção". Caparica: IPQ.

**Page, E. S.** (1954). "Continuous inspection schemes". *Beometrika*, Vol. 41, pp. 100-115.

**Pereira, Z. L., Requeijo, J. G.** (2008). "Qualidade: planeamento e controlo estatístico de processos". Lisboa: PREFÁCIO.

**Pinto, S. S.** (2006). "Gestão de risco na Marinha Portuguesa: um caso de sucesso". *Revista Militar*. N° 2448.

**Pires, A. R.** (2007). "Qualidade - sistemas de gestão da qualidade". (4ª ed.). Lisboa: Sílabo Lda.

**Prajapati, D. R.** (2011). "A new approach to monitor the process dispersion". *International Journal of Quality & Management Reliability*, pp. 280-297.

**Prajapati, D. R., Mahapatra, P. B.** (2008). "A simple and effective X chart for process monitoring". *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 25, pp. 508-531.

**Quesenberry, C. P.** (1997). "SPC methods for quality improvement". New York: John Wiley & Sons.

**Randall, R. B.** (2011). "Vibration-based condition monitoring". UK: John Wiley & Sons Ltd.

**Roberts, S. W.** (1959). "Control charts tests based on geometric moving averages". *Technometrics*, Vol. 1, pp. 239-250.

**Roque, A. A.** (2005). "Controlo de condição em rolamentos". Oeiras: DatAnálise, Lda.

**Saranga, H.** (2002). "Relevant condition-parameter strategy for an effective condition-based maintenance". *Journal of Quality in Maintenance* Vol. 8, pp. 92-105.

**Scheffer, C., Girdhar, P.** (2004). "Practical machinery vibration analysis & predictive maintenance". (1st ed.). Oxford: ELSIVIER.

**Simões, J. M., Gomes, C. F., Yasmin, M. M.** (2011). "A literature review of maintenance performance measurement: a conceptual framework and directions for future research". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 17, pp. 116-137.

## Bibliografia

- Tsang**, A. H. (1995). "Condition-based maintenance: tools and decision making". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 1, pp. 3-17.
- Wang**, W., Zhang, W. (2008). "Reviews and case studies early defect identification: application of statistical process control methods". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 14, pp. 225-236.
- Western**, E. (1956). *"Statistical quality control handbook"*. Indianapolis: Wester Electric.
- Wheeler**, D. J. (1995). *"Advanced topics in statistical process control"*. Tennessee: Knoxville: SPC Press.
- Woodall**, W. H. (2000). "Controversies and contradictions in statistical process control". *Journal of Quality Technology*, Vol. 32, pp. 341-350.
- Wu**, Z., Jiao, J., Yang, M., Liu, Y., & Wang, Z. (2008). "An enhanced adaptative CUSUM control chart". *IIE Transactions*, pp. 642-653.

## ***Bibliografia online***

- Marinha**. (2009a). "Funções e tarefas do poder naval nacional". Obtido em 14 de Dezembro de 2011, de Marinha: <http://www.marinha.pt/pt/amarinha/actividade/pages/funcoes.aspx>
- Marinha**. (2009b). "Missão". Obtido em 14 de Dezembro de 2011, de Marinha: <http://www.marinha.pt/pt/amarinha/pages/missao.aspx>
- Marinha**. (2010). "Escola Naval". Obtido em 7 de Dezembro de 2011, de Escola Naval: [http://escolanaval.marinha.pt/PT/escola/Pages/escolanaval\\_2010.aspx](http://escolanaval.marinha.pt/PT/escola/Pages/escolanaval_2010.aspx)



# ANEXOS

---

**Anexo I - Factores para construção das Cartas de Controlo**

**Anexo II - Estimação dos parâmetros (Fase 1)**

**Anexo III - Ábacos para cartas CUSUM e EWMA**

**Anexo IV - Monitorização (Fase 2)**



# Anexo I - Factores para construção das Cartas de Controlo

## I.1. Constantes para Cartas Tradicionais de Variáveis

Factores para construção das cartas de controlo de variáveis

Dimensão Amostra	Carta da Média				Carta do Desvio Padrão						Carta da Amplitude			
	Factores Limites Controlo				Factores Limites Controlo						Factores Limites Controlo			
	A	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	d <sub>2</sub>	C <sub>4</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>	d <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>
2	2,121	1,881	2,659	1,128	0,7979	0	3,267	0	2,606	0,853	0	3,686	0	3,267
3	1,732	1,023	1,954	1,693	0,8662	0	2,568	0	2,276	0,888	0	4,358	0	2,575
4	1,500	0,729	1,628	2,059	0,9213	0	2,266	0	2,088	0,880	0	4,698	0	2,282
5	1,342	0,577	1,427	2,326	0,9400	0	2,089	0	1,964	0,864	0	4,918	0	2,115
6	1,225	0,483	1,287	2,534	0,9515	0,030	1,970	0,029	1,874	0,848	0	5,078	0	2,004
7	1,134	0,419	1,182	2,704	0,9594	0,118	1,882	0,113	1,806	0,833	0,204	5,204	0,076	1,924
8	1,061	0,373	1,099	2,847	0,9650	0,185	1,815	0,179	1,751	0,820	0,388	5,306	0,136	1,864
9	1,000	0,337	1,032	2,970	0,9693	0,239	1,761	0,232	1,707	0,808	0,547	5,393	0,184	1,816
10	0,949	0,308	0,975	3,078	0,9727	0,284	1,716	0,276	1,669	0,797	0,687	5,469	0,223	1,777
11	0,905	0,285	0,927	3,173	0,9754	0,321	1,679	0,313	1,637	0,787	0,811	5,535	0,256	1,744
12	0,866	0,266	0,886	3,258	0,9776	0,354	1,646	0,346	1,610	0,778	0,922	5,594	0,283	1,717
13	0,832	0,249	0,850	3,336	0,9794	0,382	1,618	0,374	1,585	0,770	1,025	5,647	0,307	1,693
14	0,802	0,235	0,817	3,407	0,9810	0,406	1,594	0,399	1,563	0,763	1,118	5,696	0,328	1,672
15	0,775	0,223	0,789	3,472	0,9823	0,428	1,572	0,421	1,544	0,756	1,203	5,741	0,347	1,653
16	0,750	0,212	0,763	3,532	0,9835	0,448	1,552	0,440	1,526	0,750	1,282	5,782	0,363	1,637
17	0,728	0,203	0,739	3,588	0,9845	0,466	1,534	0,458	1,511	0,744	1,356	5,820	0,378	1,622
18	0,707	0,194	0,718	3,640	0,9854	0,482	1,518	0,475	1,496	0,739	1,424	5,856	0,391	1,608
19	0,688	0,187	0,698	3,689	0,9862	0,497	1,503	0,490	1,483	0,734	1,487	5,891	0,403	1,597
20	0,671	0,180	0,680	3,735	0,9869	0,510	1,490	0,504	1,470	0,729	1,549	5,921	0,415	1,585
21	0,655	0,173	0,663	3,778	0,9876	0,523	1,477	0,516	1,459	0,724	1,605	5,951	0,425	1,575
22	0,640	0,167	0,647	3,819	0,9882	0,534	1,466	0,528	1,448	0,720	1,659	5,979	0,434	1,566
23	0,626	0,162	0,633	3,858	0,9887	0,545	1,455	0,539	1,438	0,716	1,710	6,006	0,443	1,557
24	0,612	0,157	0,619	3,895	0,9892	0,555	1,445	0,549	1,429	0,712	1,759	6,031	0,451	1,548
25	0,600	0,153	0,606	3,931	0,9896	0,565	1,435	0,559	1,420	0,708	1,806	6,056	0,459	1,541



## Anexo II – Estimação dos parâmetros (Fase 1)

### II. 1 – Resultados do ponto 2

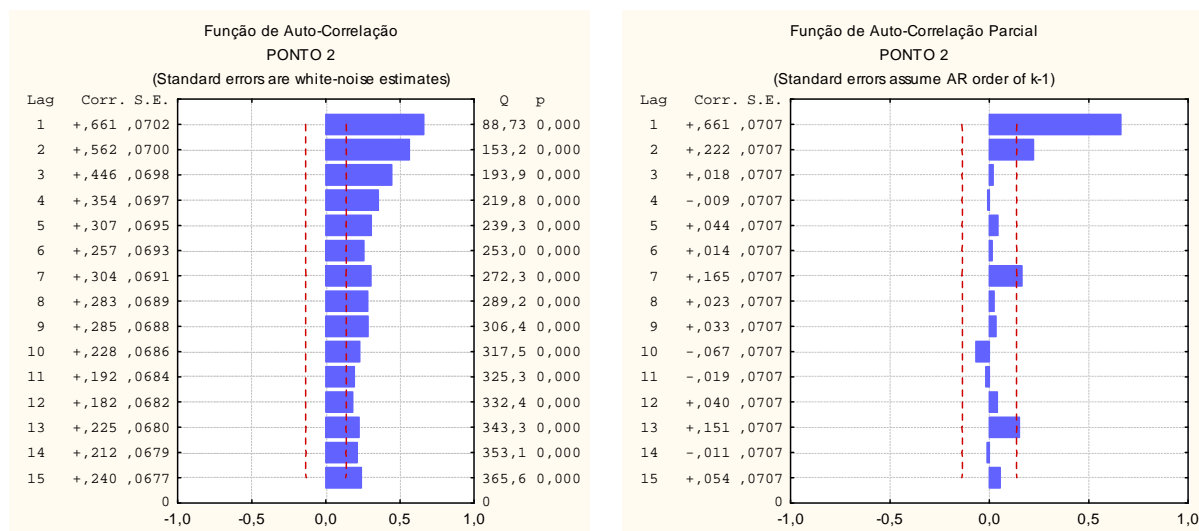


Figura II.1.1 FACE e FACPE dos dados referentes ao ponto 2

Tabela II.1.1 Parâmetros do modelo ajustado ao ponto 2

$\hat{\xi}$	$\hat{\phi}_1$	$\hat{\phi}_2$
0,128	0,513	0,224

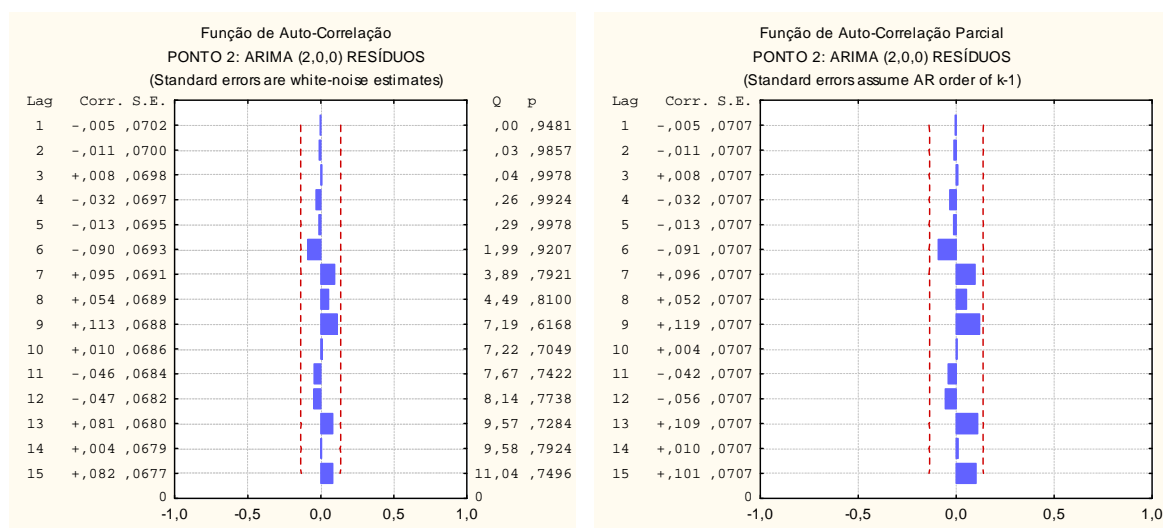


Figura II.1.2 FACE e FACPE dos resíduos referentes ao ponto 2

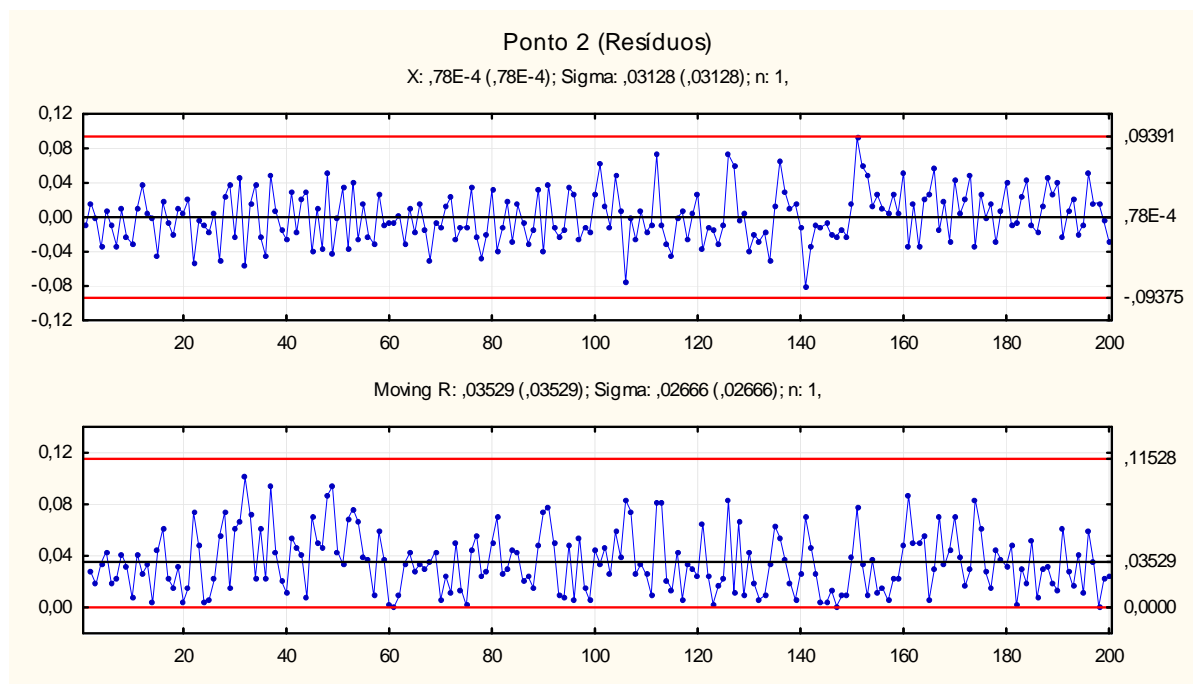
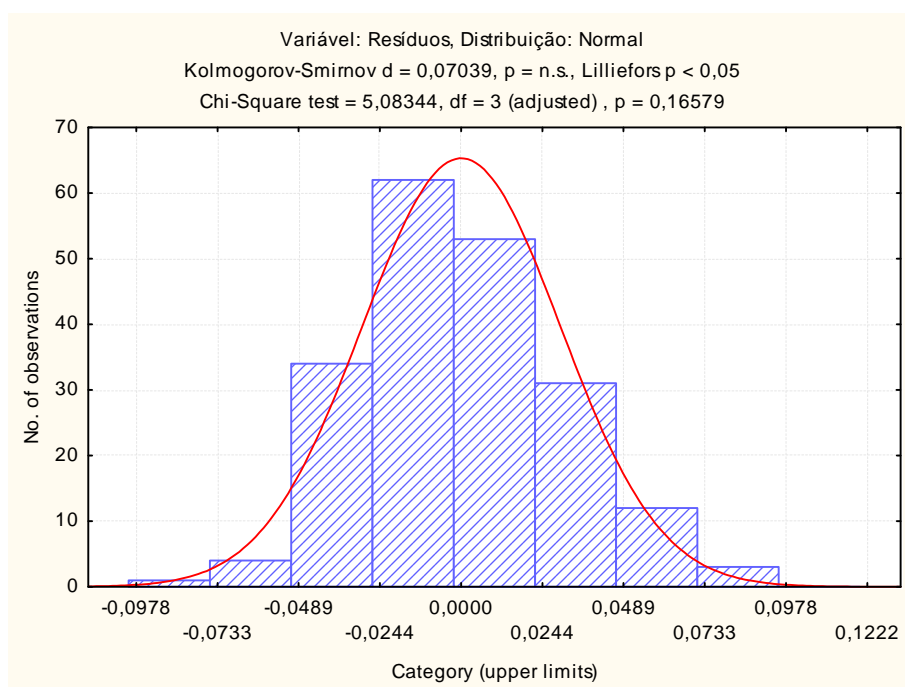


Figura II.1.3 Carta de controlo  $e - MR$  dos resíduos do ponto 2



**Figura II.1.4 Verificação da Normalidade dos resíduos revistos referentes ao ponto 2**

II.2 – Resultados do ponto 3

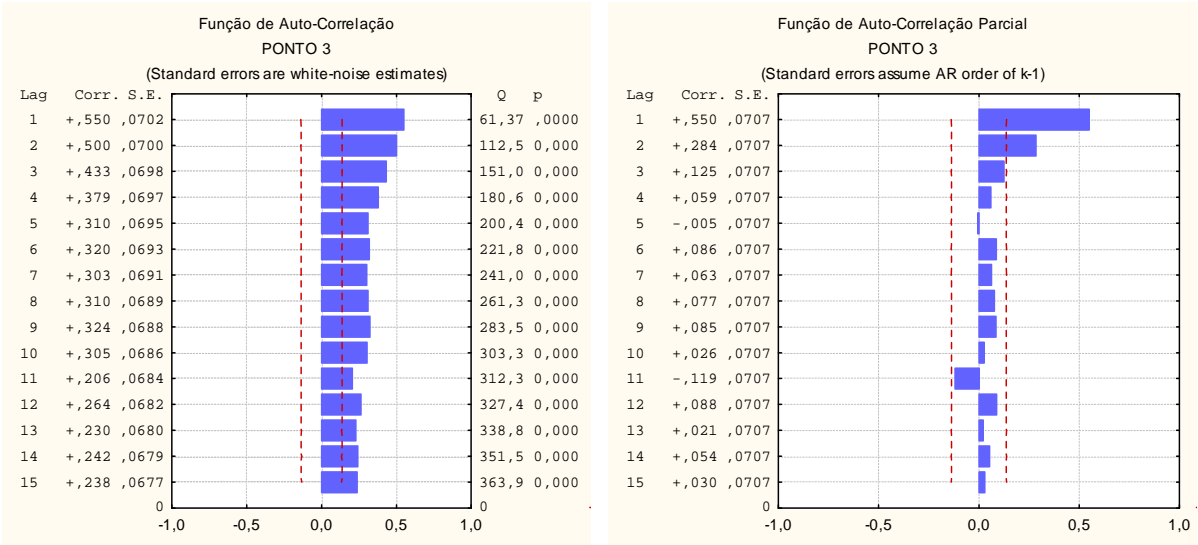


Figura II.2.1 FACE e FACPE dos dados referentes ao ponto 3

Tabela II.2.1 Parâmetros do modelo ajustado ao ponto 3

$\hat{\xi}$	$\hat{\phi}_1$	$\hat{\phi}_2$
0,132	0,394	0,286

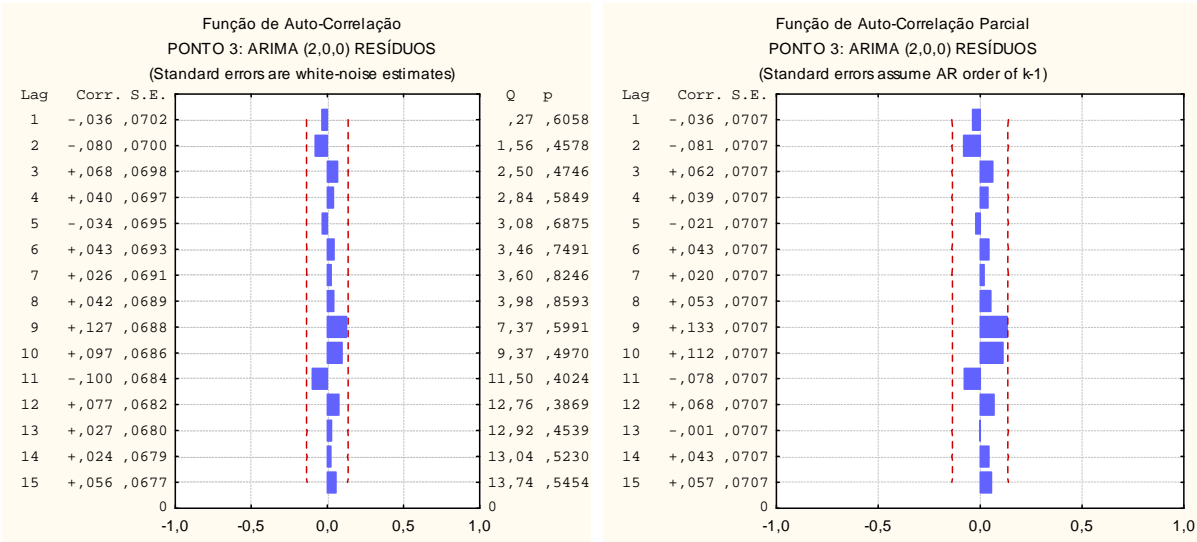
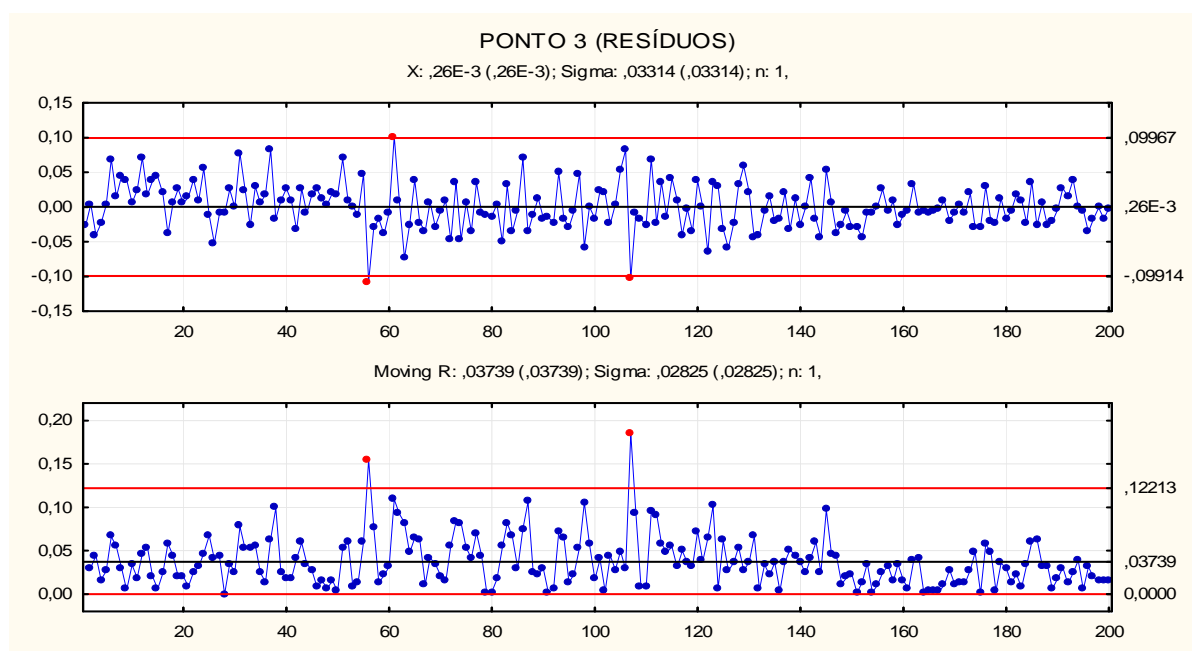


Figura II.2.2 FACE e FACPE dos resíduos referentes ao ponto 3



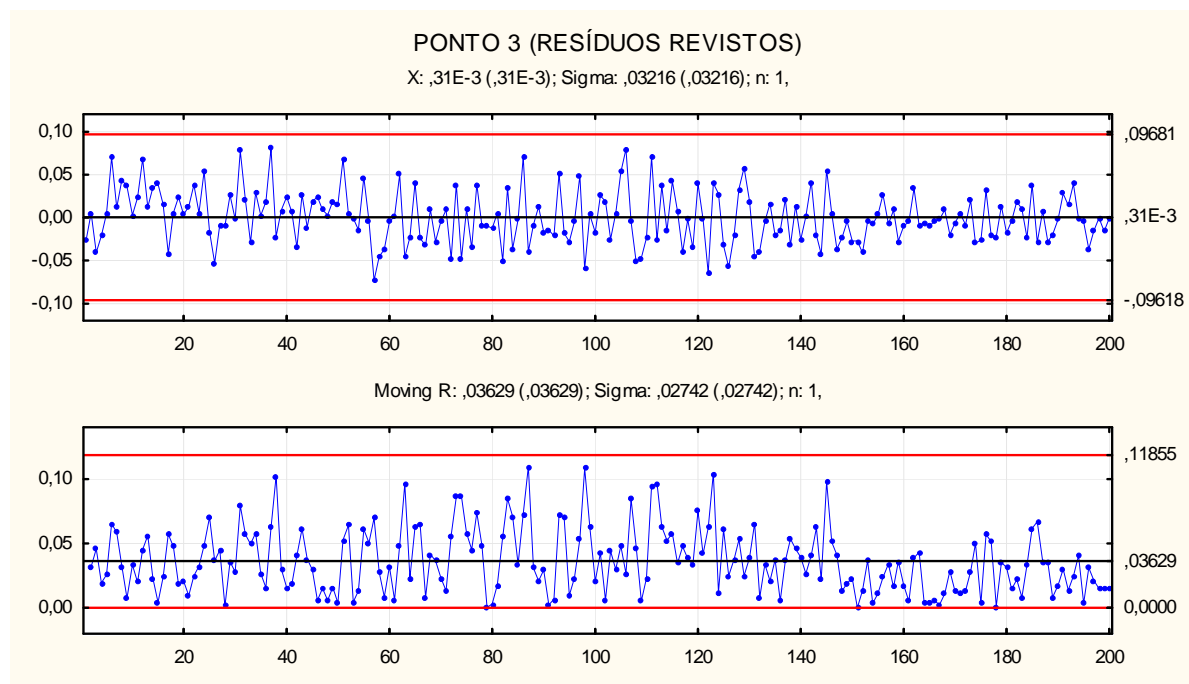


**Figura II.2.3 Carta de controlo  $\bar{x}$ – $MR$  dos resíduos do ponto 3**

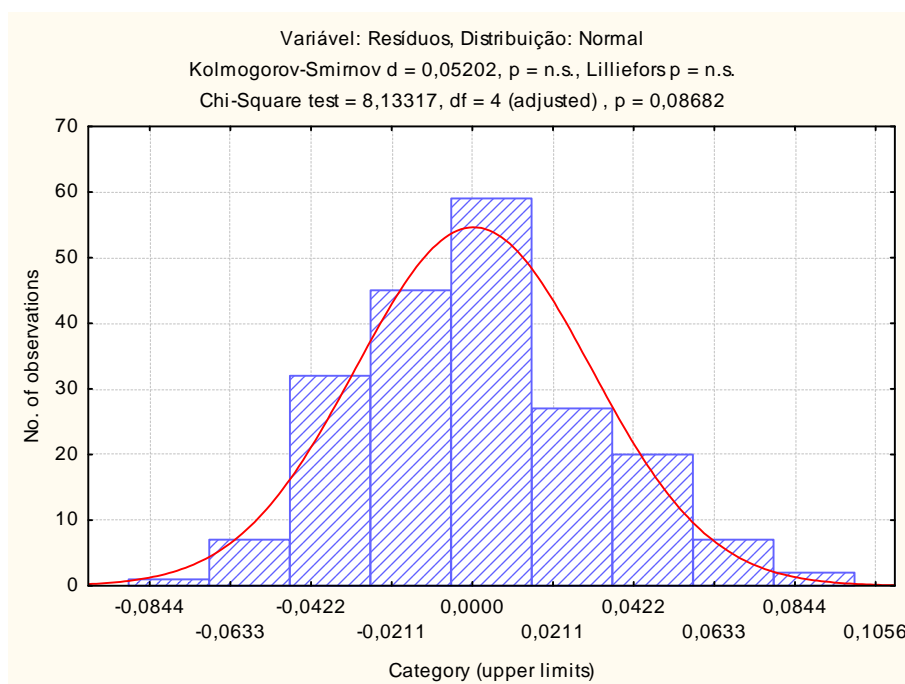
Substituindo o valor dos pontos fora pelos seus valores esperados, reajusta-se o modelo *ARIMA* obtendo-se:

**Tabela II.2.2 Parâmetros do modelo ajustado ao ponto 3 revisto**

$\hat{\xi}$	$\hat{\phi}_1$	$\hat{\phi}_2$	$\hat{\rho}_1$	$\hat{\rho}_2$
0,116	0,449	0,269	0,612	0,267



**Figura II.2.4 Carta de controlo  $e-MR$  dos resíduos revistos do ponto 3**



**Figura II.2.5 Verificação da Normalidade dos resíduos revistos referentes ao ponto 3**

## II.3 – Resultados do ponto 4

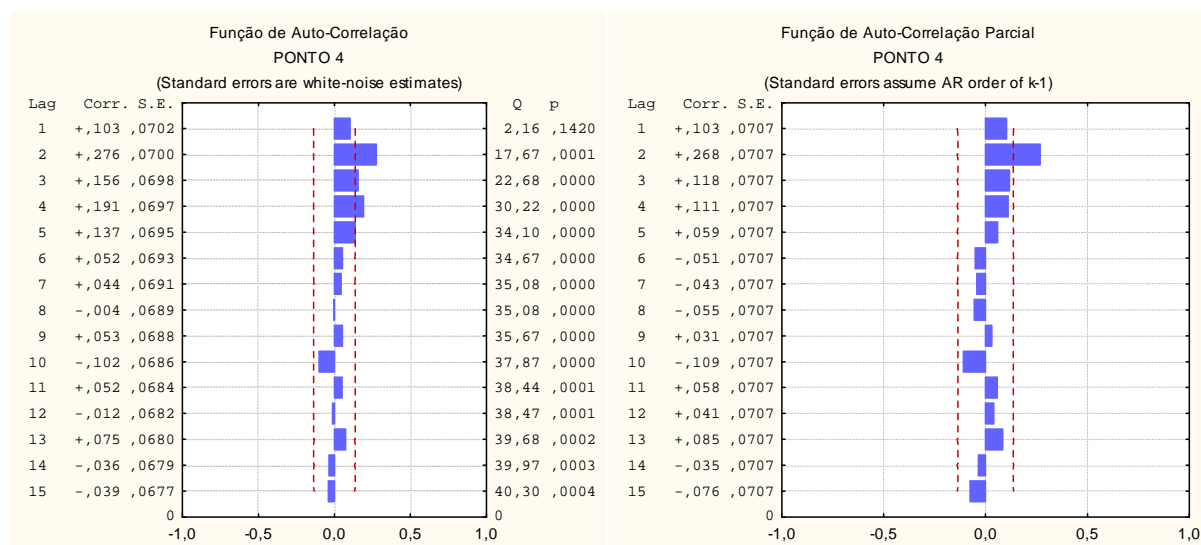


Figura II.3.1 FACE e FACPE dos dados referentes ao ponto 4

Tabela II.3.1 Parâmetros do modelo ajustado ao ponto 4

$\hat{\xi}$	$\hat{\phi}_1$	$\hat{\phi}_2$
0,487	0,076	0,273

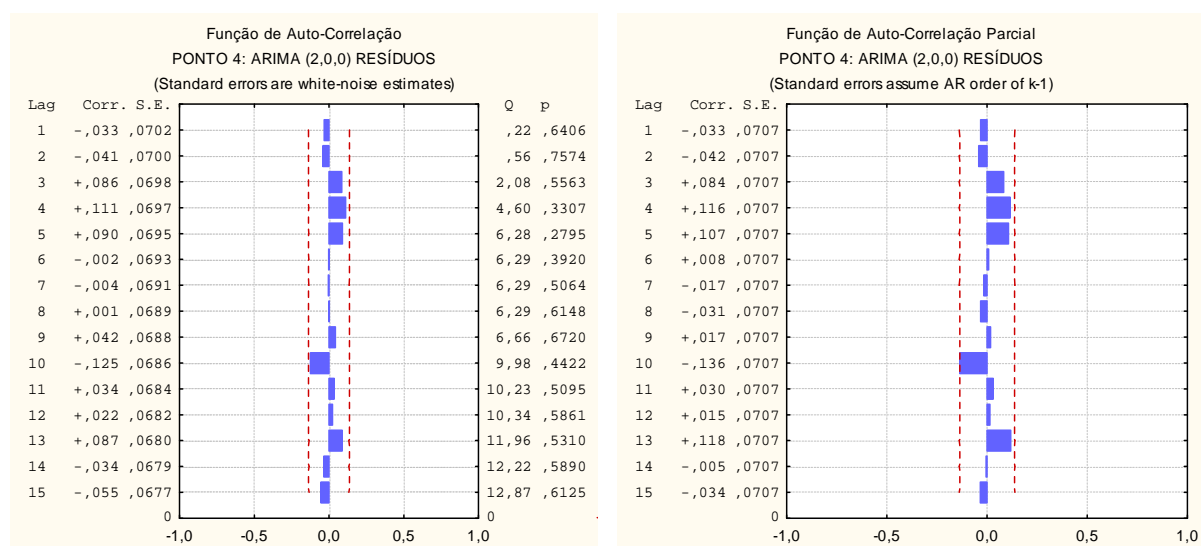
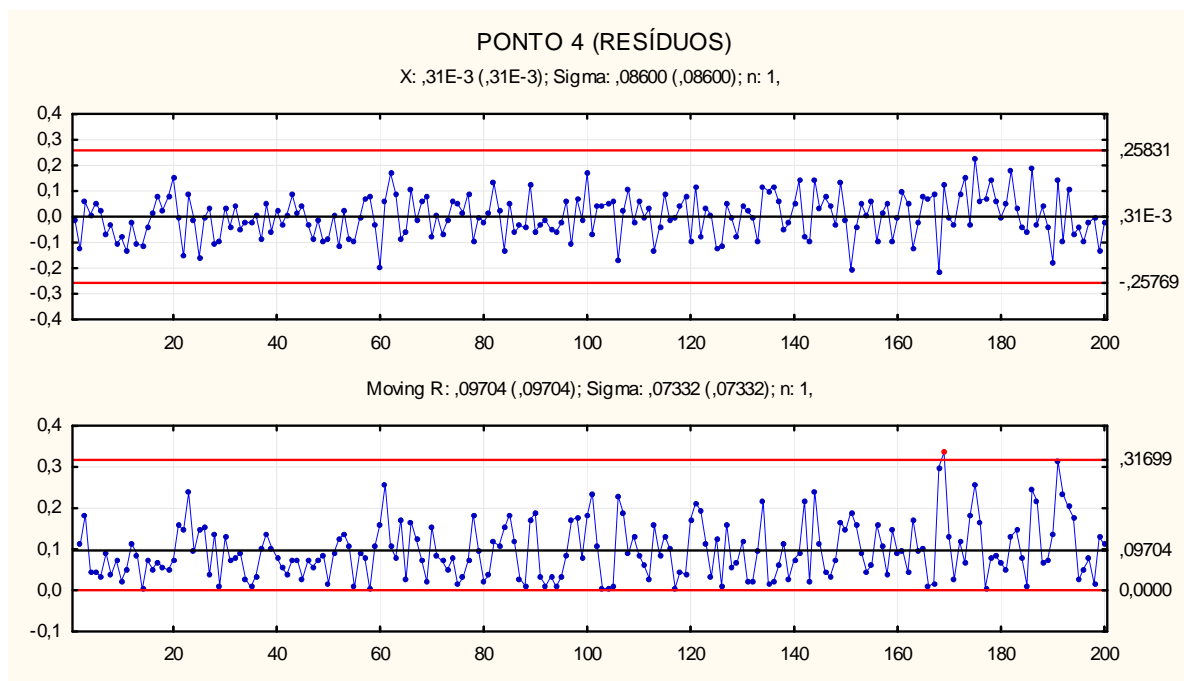


Figura II.3.2 FACE e FACPE dos resíduos referentes ao ponto 4

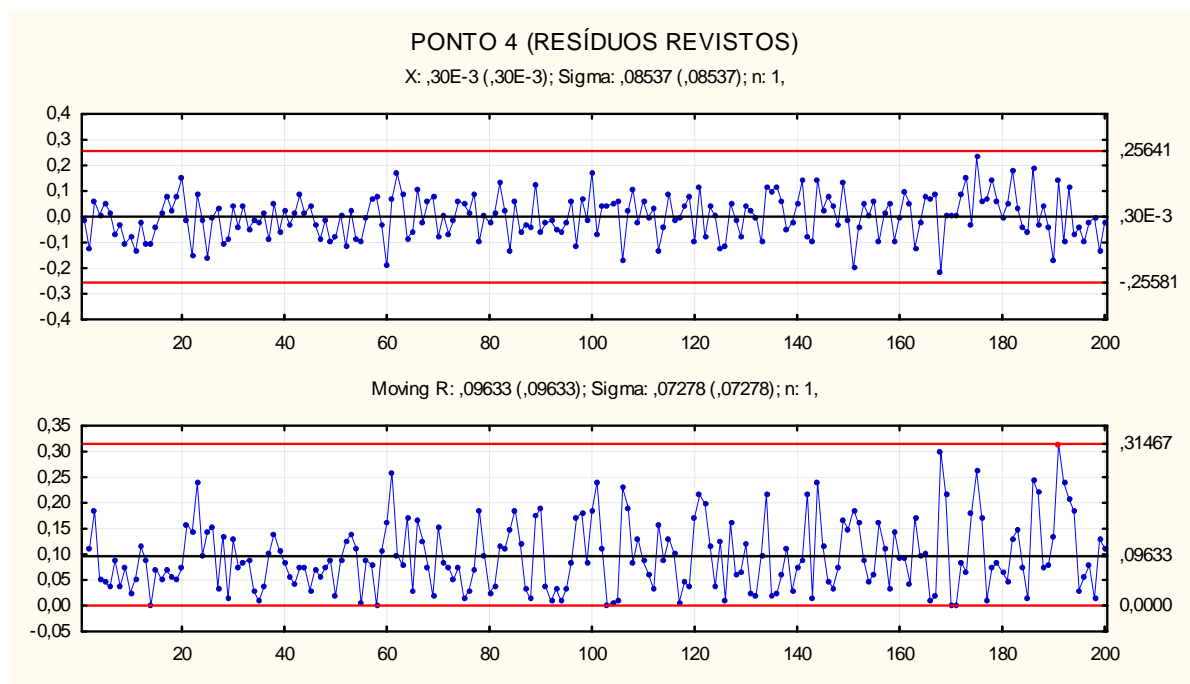


**Figura II.3.3 Carta de controle  $e - MR$  dos resíduos do ponto 4**

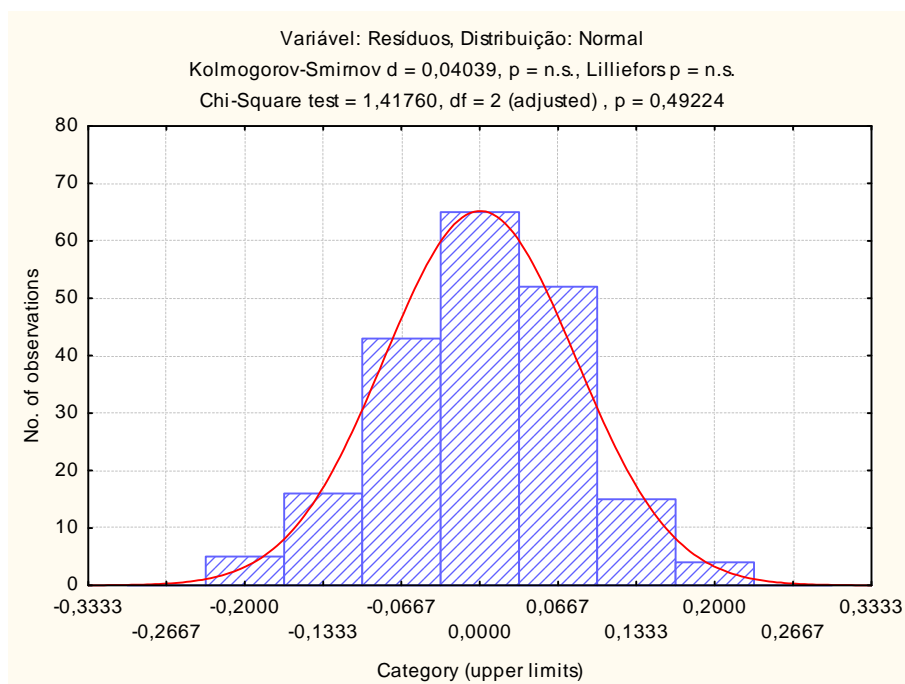
Reajustando o modelo após a substituição dos valores dos pontos fora pelos seus valores esperados:

**Tabela II.3.2 Parâmetros do modelo ajustado ao ponto 4 revisto**

$\hat{\xi}$	$\hat{\phi}_1$	$\hat{\phi}_2$	$\hat{\rho}_1$	$\hat{\rho}_2$
0,472	0,116	0,251	0,153	0,246



**Figura II.3.4 Carta de controlo e – MR dos resíduos revistos do ponto 4**



**Figura II.3.5 Verificação da Normalidade dos resíduos revistos referentes ao ponto 4**



## Anexo III - Ábacos para cartas CUSUM e EWMA

### II.1. Ábacos para cartas CUSUM

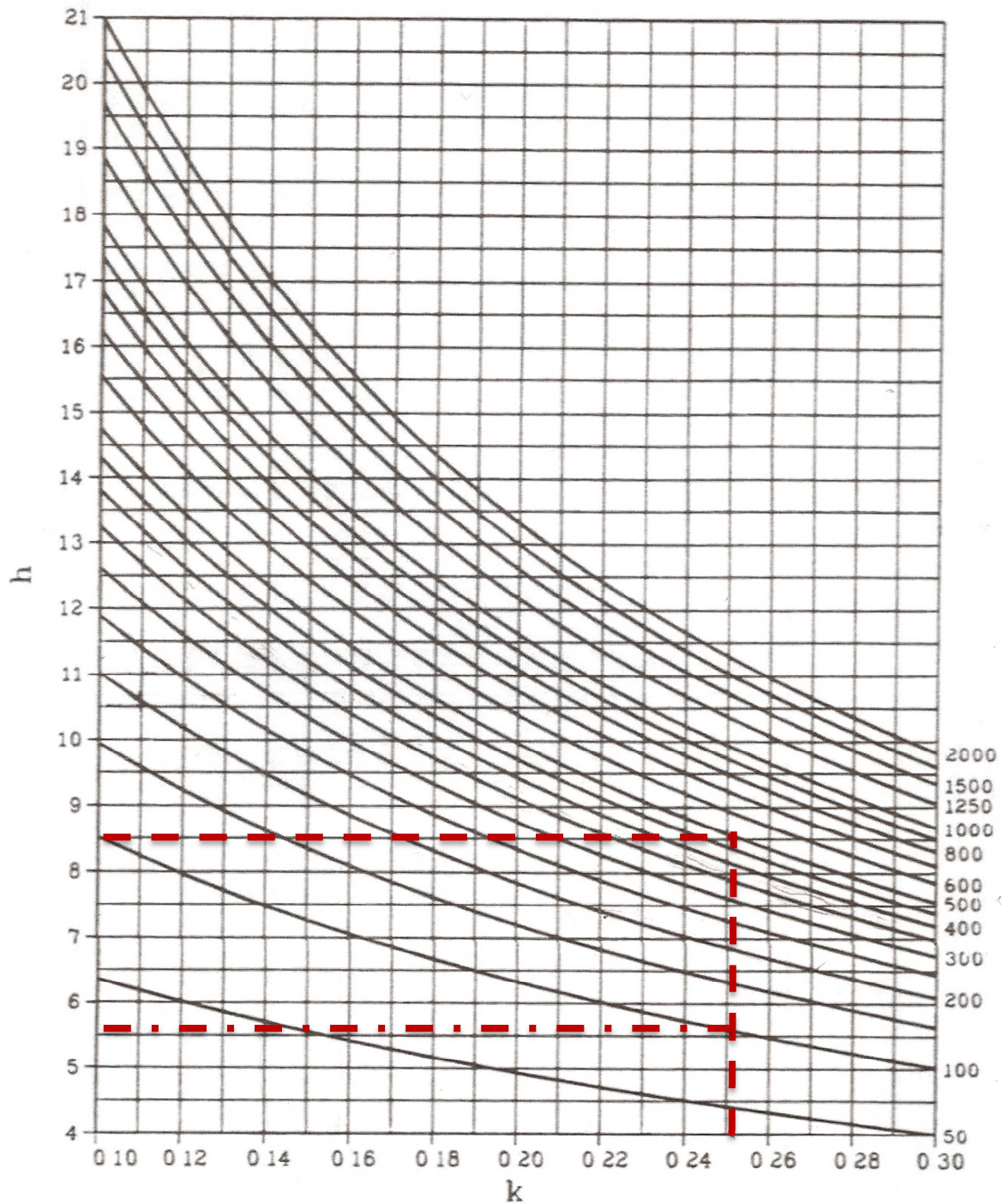


Figura III.1.1 Combinação de  $k$  e  $h$  da carta CUSUM, com  $C_0 = 0$  e  $T_0 = 0$ , para vários valores de

$ARL_{Em\ Controlado}$



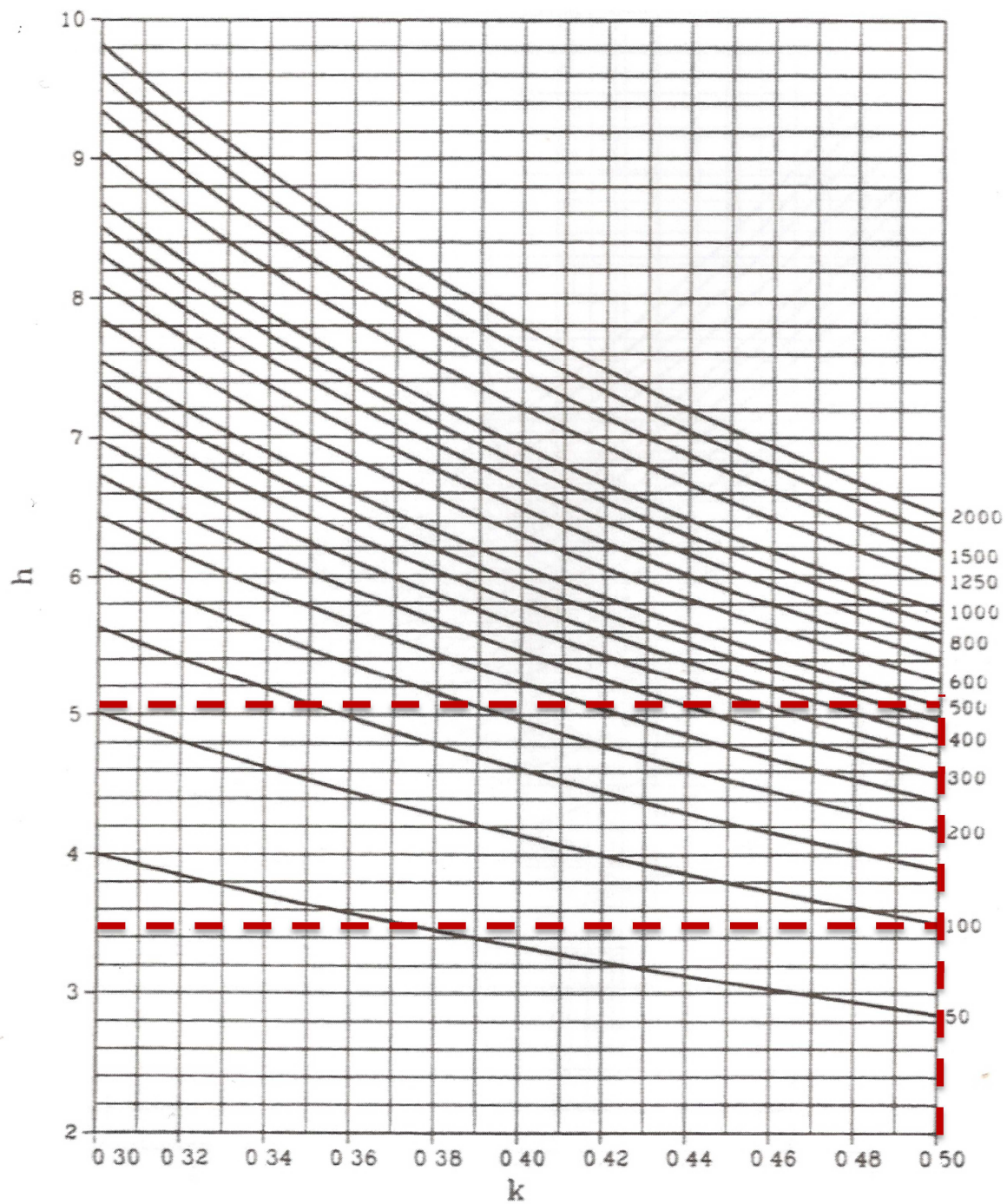


Figura III.1.2 Combinação de  $k$  e  $h$  da carta *CUSUM*, com  $C_0 = 0$  e  $T_0 = 0$ , para vários valores de

$$ARL_{Em\ Control}$$



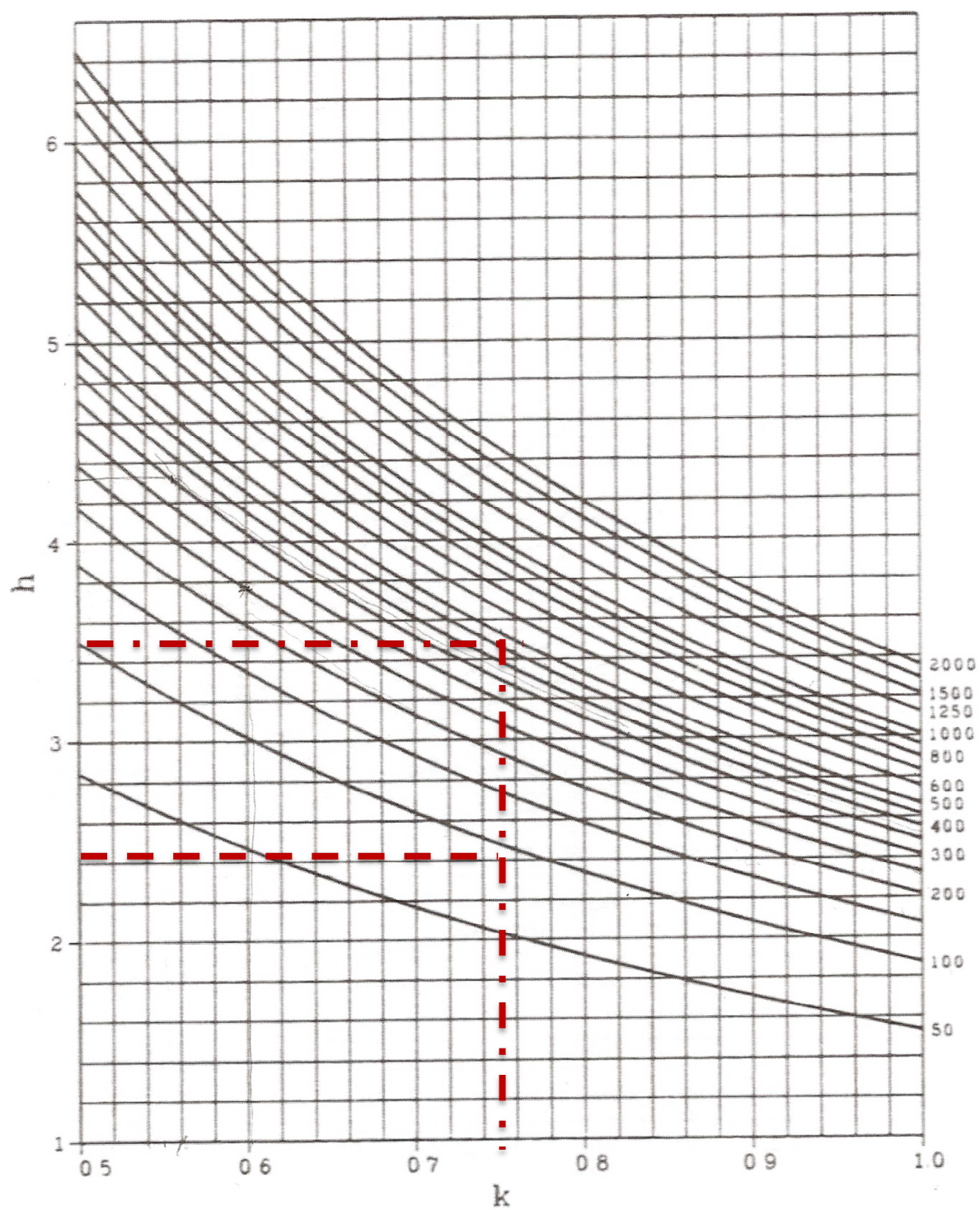


Figura III.1.3 Combinação de  $k$  e  $h$  da carta *CUSUM*, com  $C_0 = 0$  e  $T_0 = 0$ , para vários valores de  $ARL_{Em\ Control}$

### III.2. Ábacos para as cartas EWMA

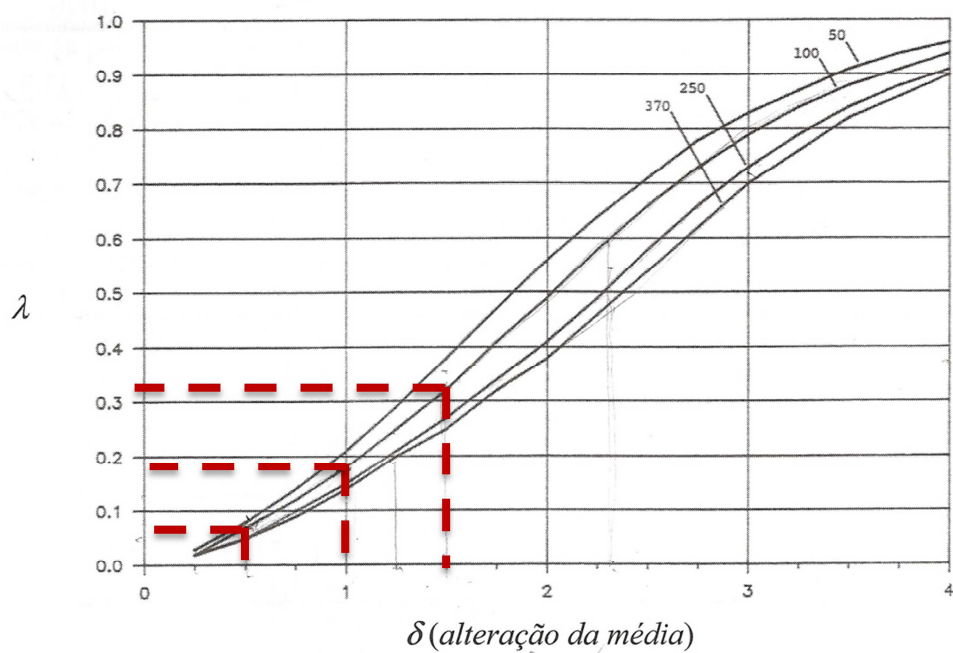


Figura III.2.1 Valor de  $\lambda$ , da carta EWMA, para vários valores de  $ARL_{Em\ Controlo}$

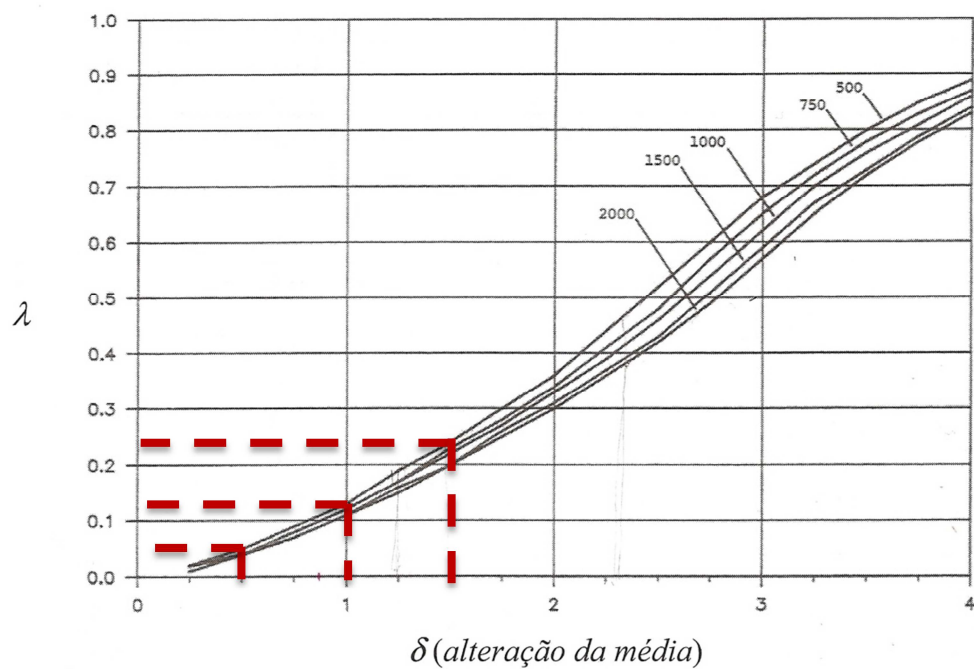


Figura III.2.2 Valor de  $\lambda$ , da carta EWMA, para vários valores de  $ARL_{Em\ Controlo}$

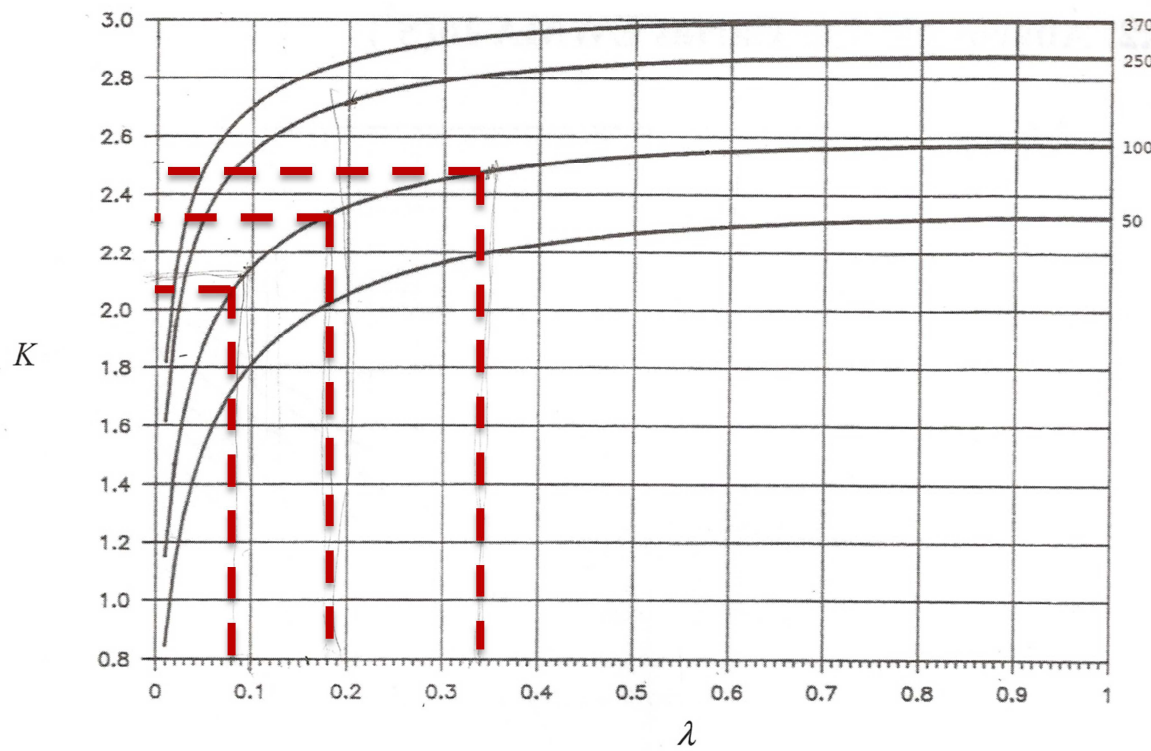


Figura III.2.3 Valor de  $\lambda$  e  $K$ , da carta *EWMA*, em função de  $ARL_{Em\ Controlo}$

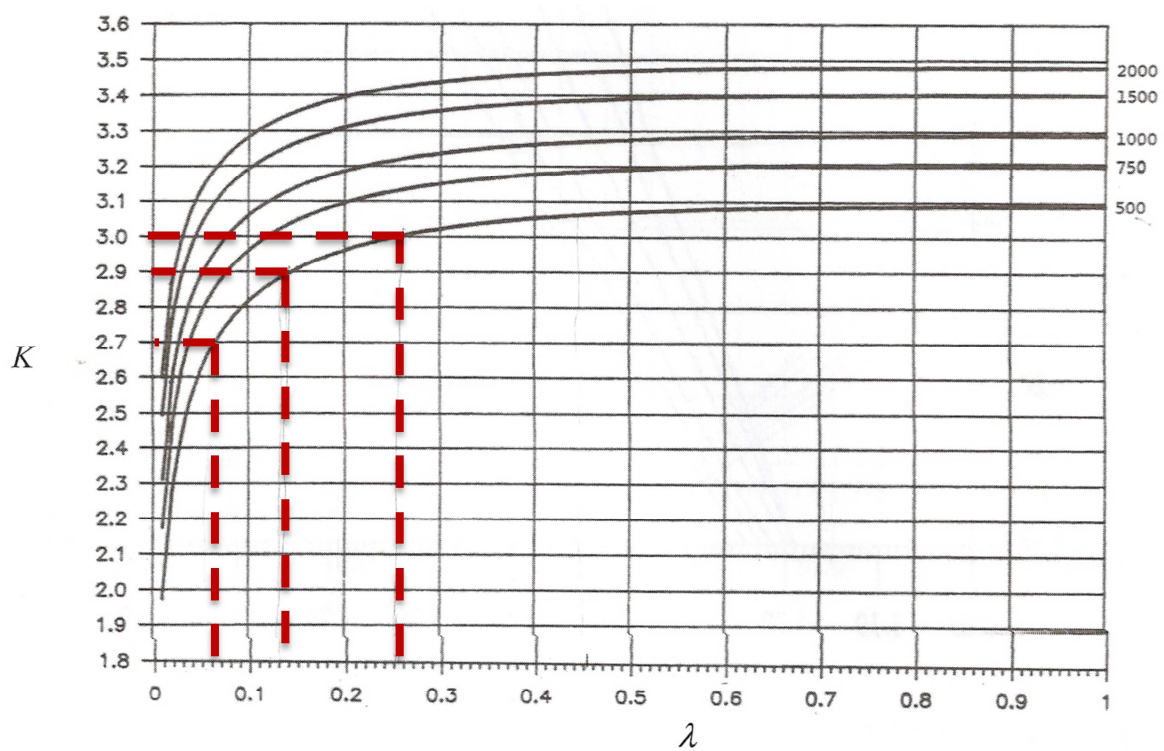


Figura III.2.4 Valor de  $\lambda$  e  $K$ , da carta *EWMA*, em função de  $ARL_{Em\ Controlo}$



## Anexo IV – Monitorização (Fase 2)

### IV.1 – Resultados do ponto 2

#### IV.1.1 – Cartas *CUSUM* Modificadas

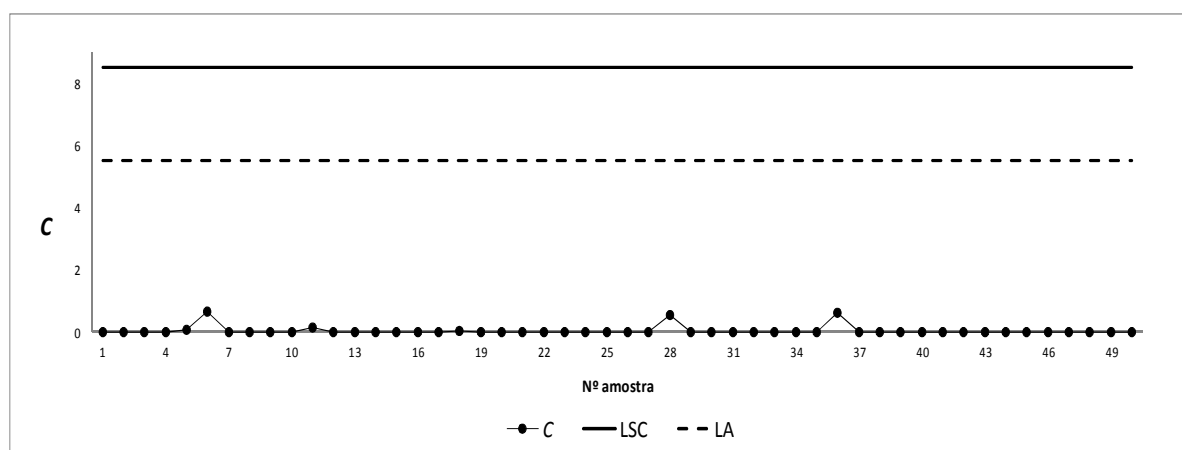


Figura IV.1.1.1 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 2) para a 1ª perturbação com  $\Delta = 0,5\sigma_{\varepsilon}$

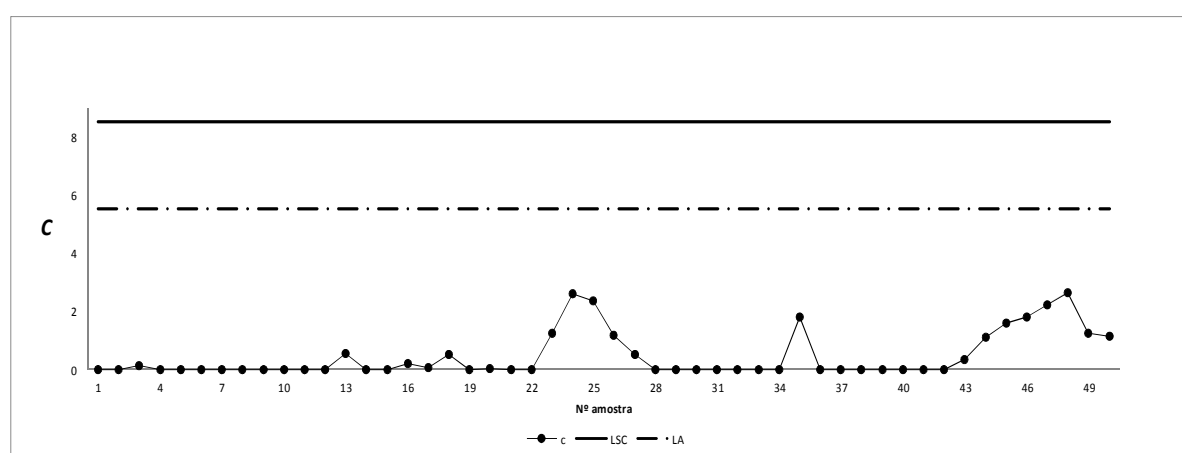


Figura IV.1.1.2 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 2) para a 2ª perturbação com  $\Delta = 0,5\sigma_{\varepsilon}$

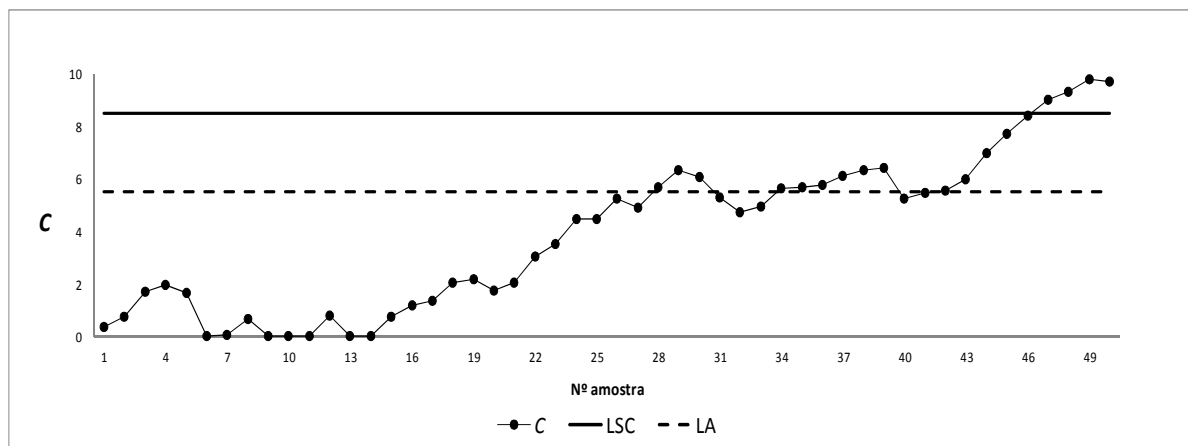


Figura IV.1.1.3 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 2) para a 3ª perturbação com  $\Delta=0,5\sigma_{\varepsilon}$

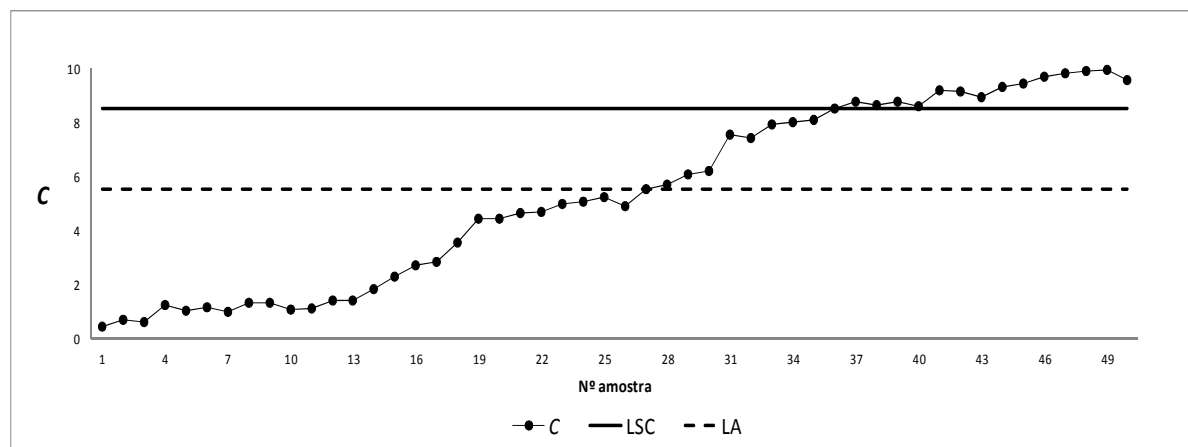


Figura IV.1.1.4 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 2) para a 4ª perturbação com  $\Delta=0,5\sigma_{\varepsilon}$

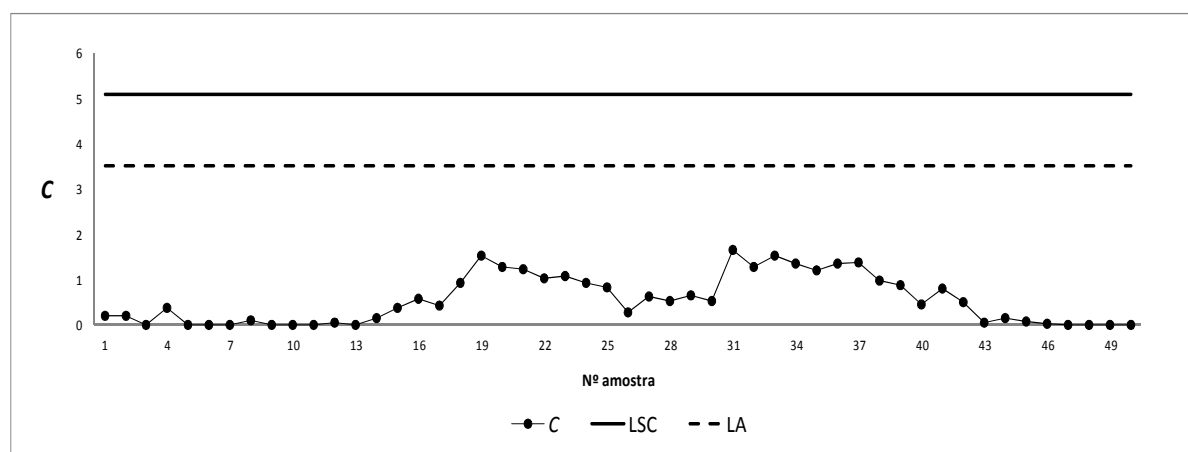


Figura IV.1.1.5 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 2) para a 4ª perturbação com  $\Delta=1\sigma_{\varepsilon}$

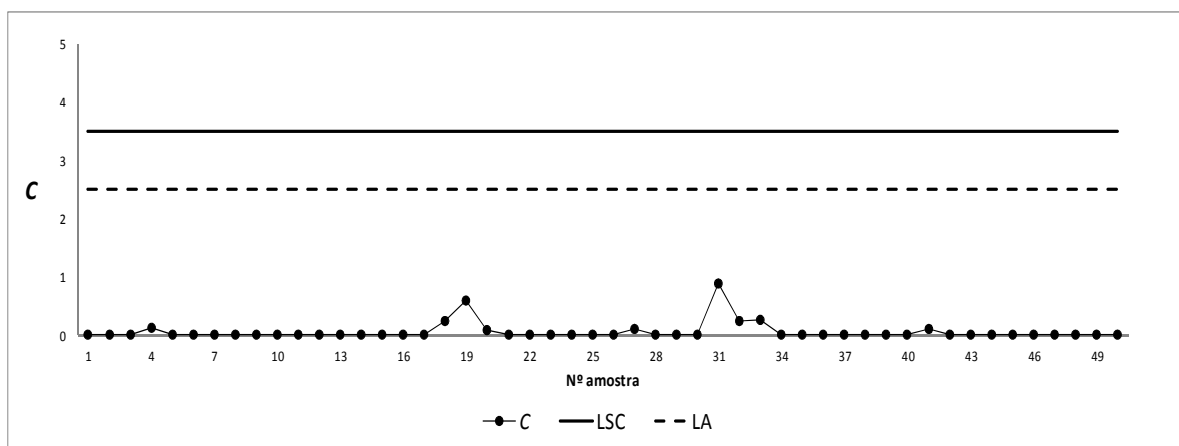


Figura IV.1.1.6 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 2) para a 4ª perturbação com  $\Delta = 1,5\sigma_{\varepsilon}$

#### IV.1.2 – Cartas *EWMA* Modificadas

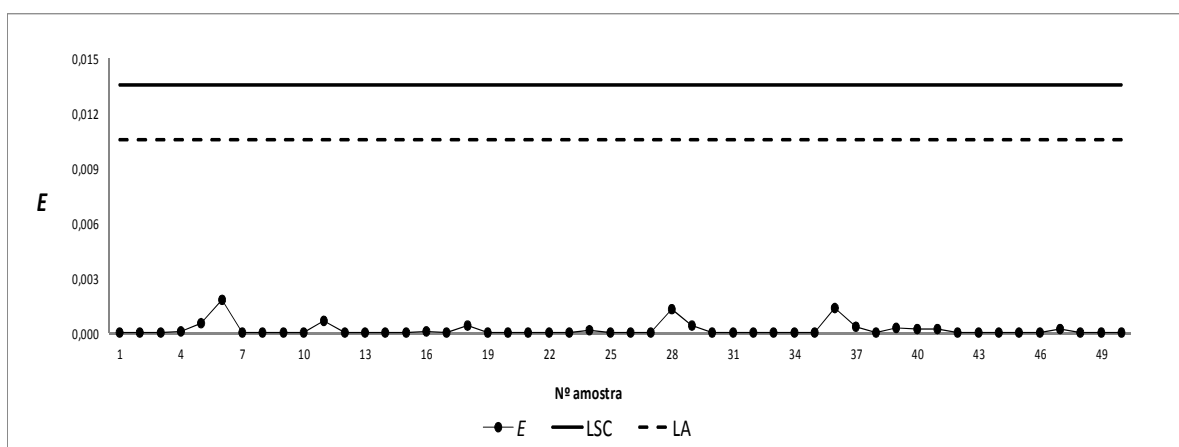


Figura IV.1.2.1 Carta *EWMA* modificada (ponto 2) para a 1ª perturbação com  $\Delta = 0,5\sigma_{\varepsilon}$

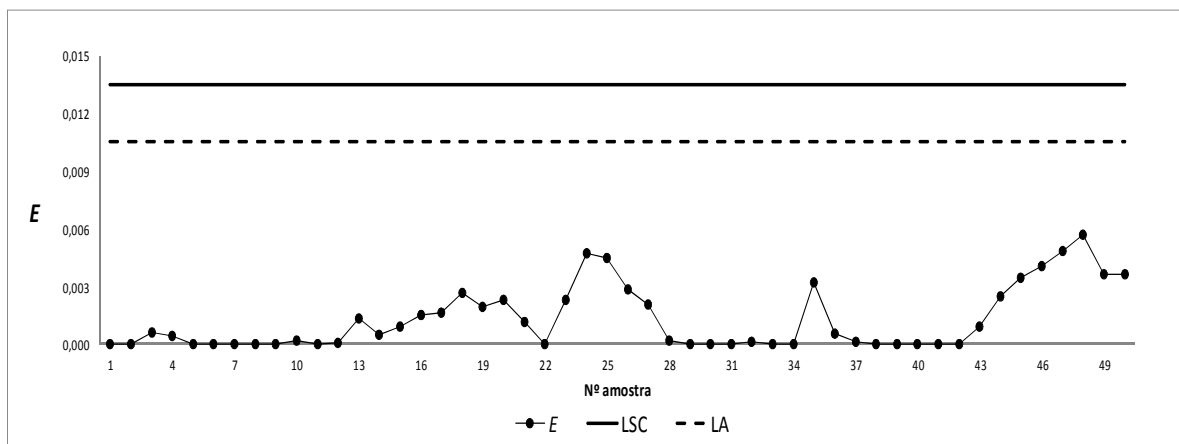


Figura IV.1.2.2 Carta *EWMA* modificada (ponto 2) para a 2ª perturbação com  $\Delta = 0,5\sigma_\epsilon$

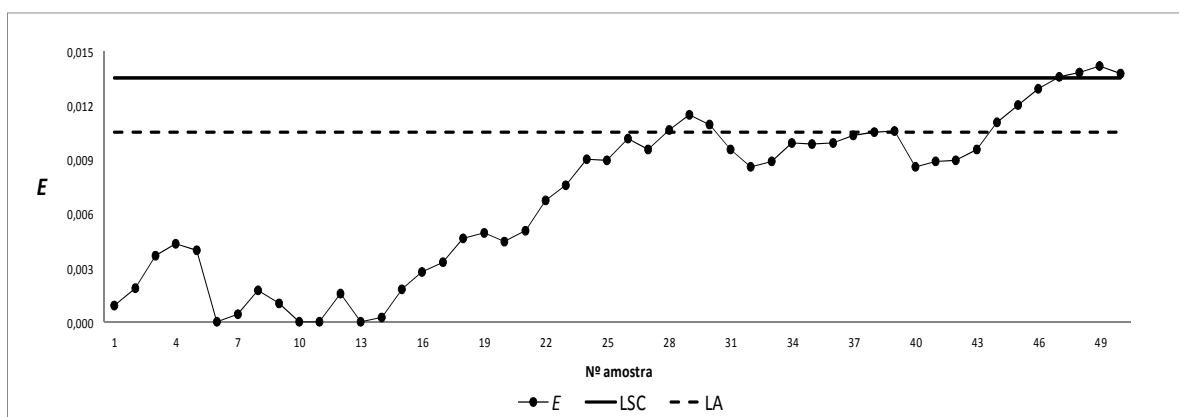


Figura IV.1.2.3 Carta *EWMA* modificada (ponto 2) para a 3ª perturbação com  $\Delta = 0,5\sigma_\epsilon$

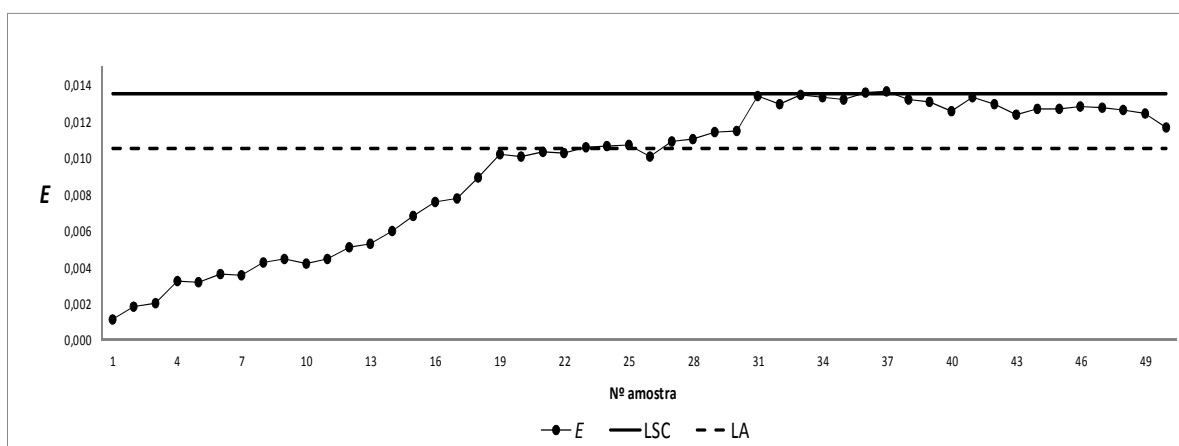


Figura IV.1.2.4 Carta *EWMA* modificada (ponto 2) para a 4ª perturbação com  $\Delta = 0,5\sigma_\epsilon$



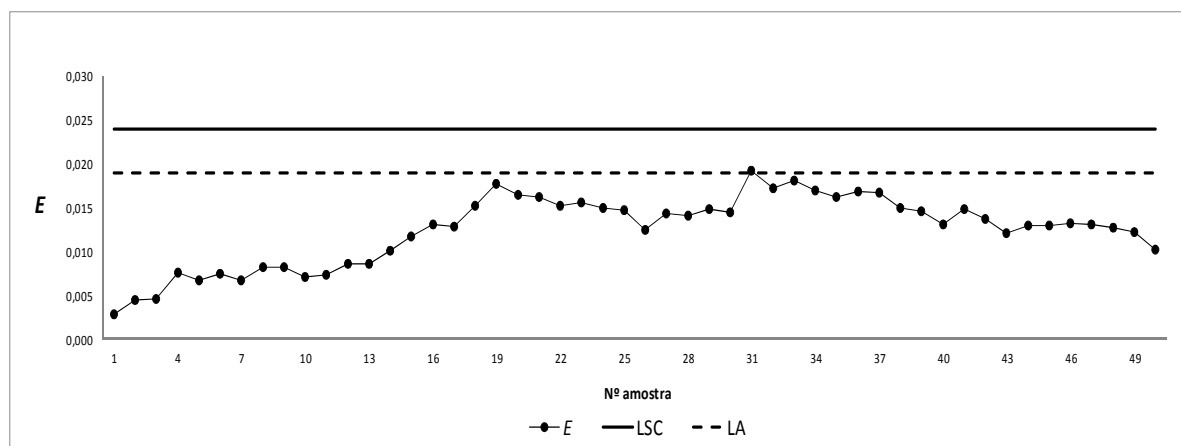


Figura IV.1.2.5 Carta *EWMA* modificada (ponto 2) para a 4ª perturbação com  $\Delta=1\sigma_{\varepsilon}$

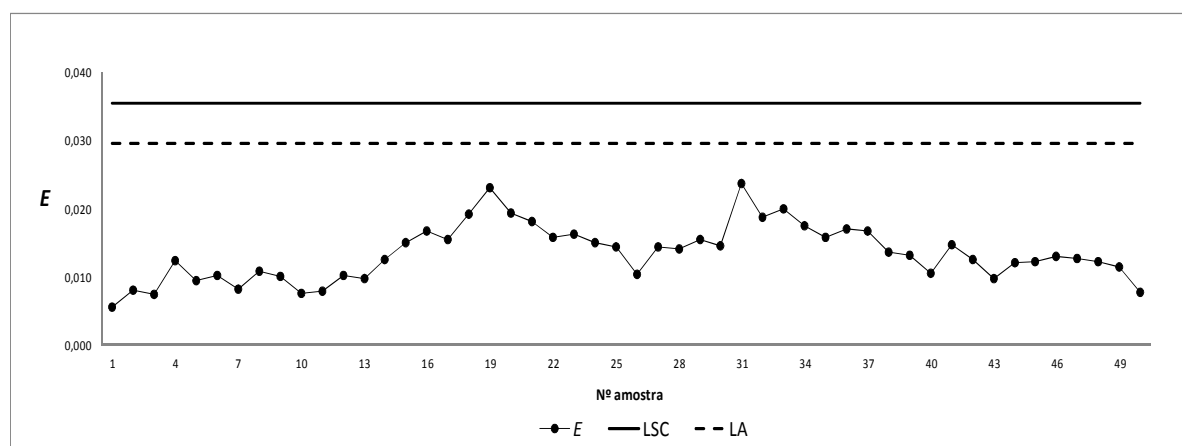


Figura IV.1.2.6 Carta *EWMA* modificada (ponto 2) para a 4ª perturbação com  $\Delta=1,5\sigma_{\varepsilon}$

## IV.2 – Resultados do ponto 3

### IV.2.1 – Cartas *CUSUM* Modificadas

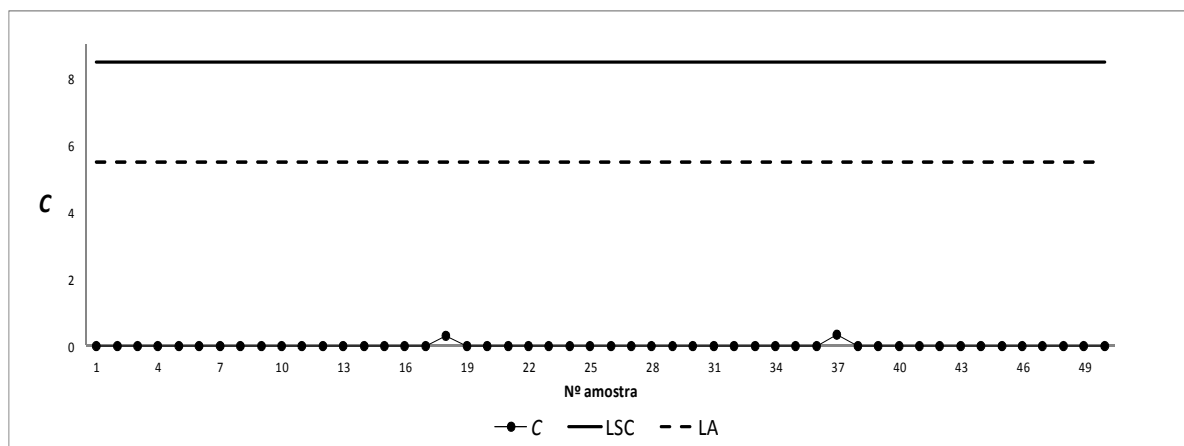


Figura IV.2.1.1 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 3) para a 1ª perturbação com  $\Delta = 0,5\sigma_{\varepsilon}$

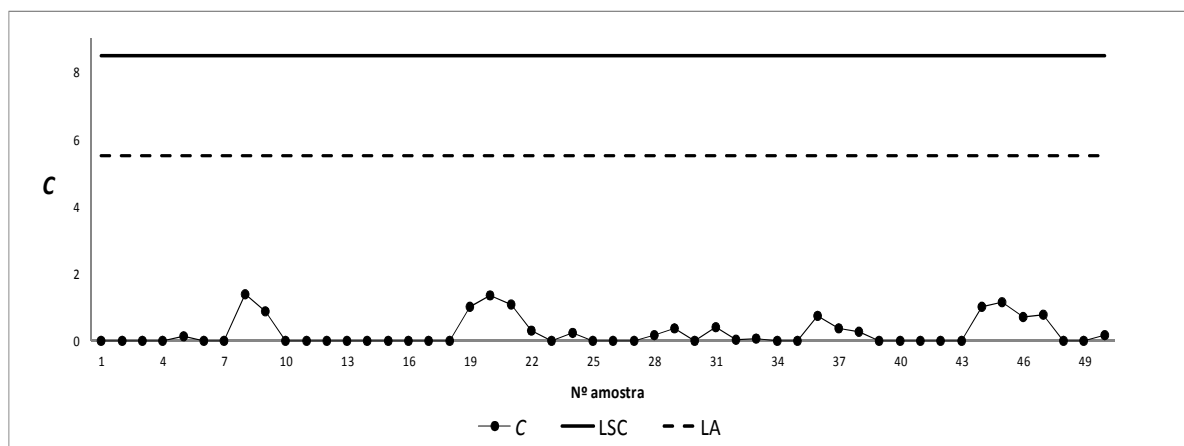


Figura IV.2.1.2 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 3) para a 2ª perturbação com  $\Delta = 0,5\sigma_{\varepsilon}$

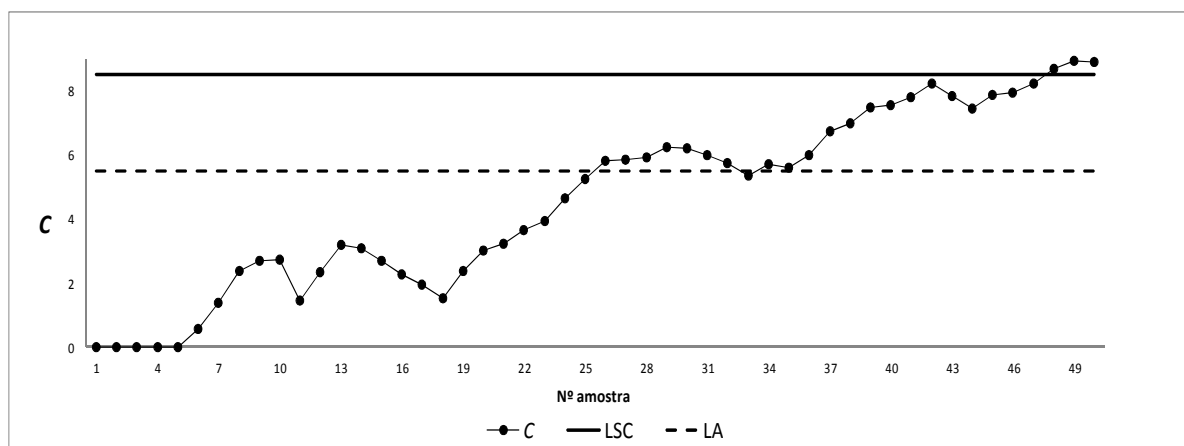


Figura IV.2.1.3 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 3) para a 3ª perturbação com  $\Delta=0,5\sigma_{\varepsilon}$

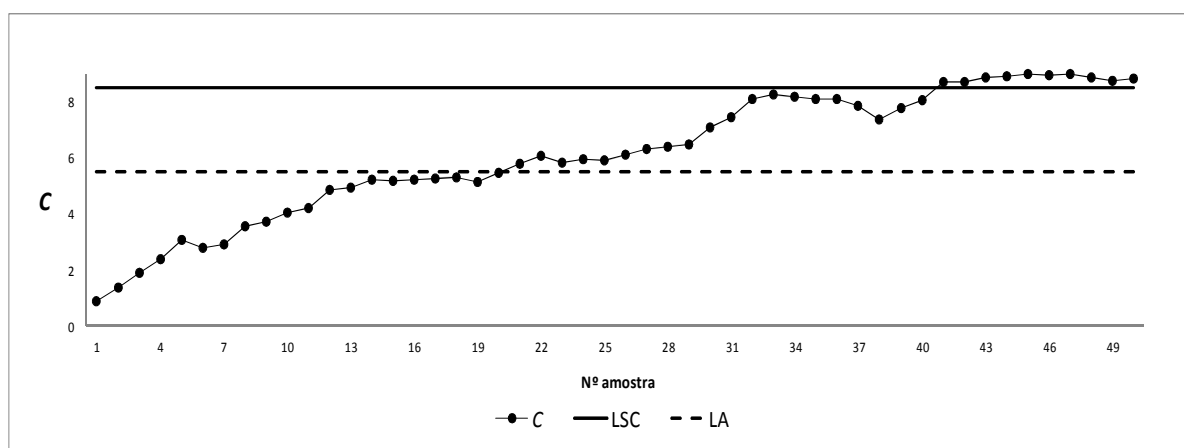


Figura IV.2.1.4 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 3) para a 4ª perturbação com  $\Delta=0,5\sigma_{\varepsilon}$

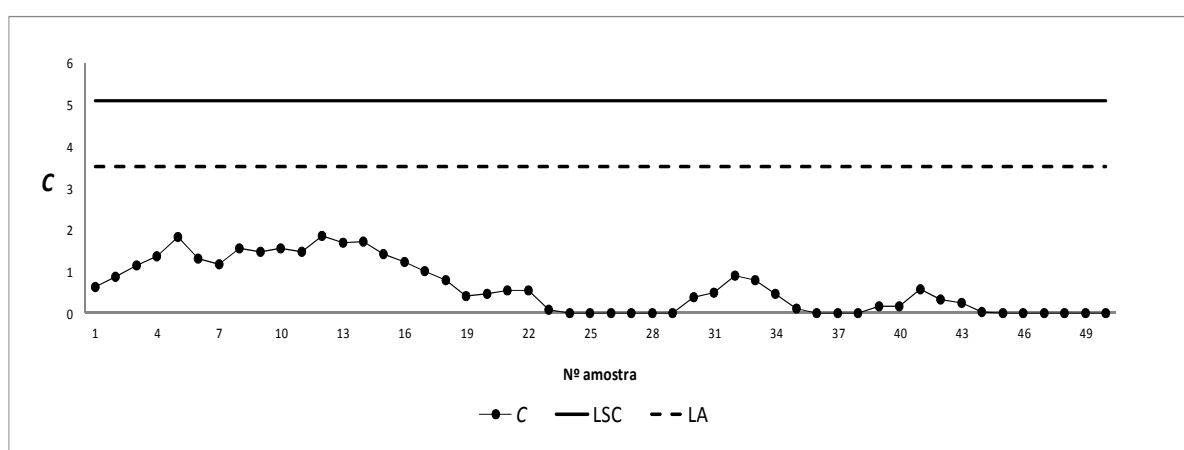


Figura IV.2.1.5 Carta *CUSUM* modificada (ponto 3) para a 4ª perturbação com  $\Delta=1\sigma_{\varepsilon}$

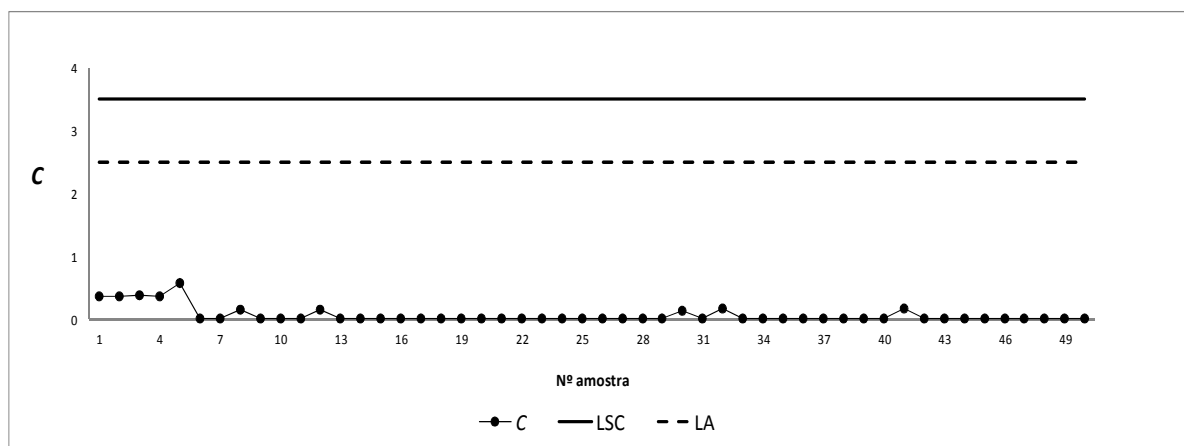


Figura IV.2.1.6 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 3) para a 4ª perturbação com  $\Delta = 1,5\sigma_{\varepsilon}$

## IV.2.2 – Cartas *EWMA* Modificadas

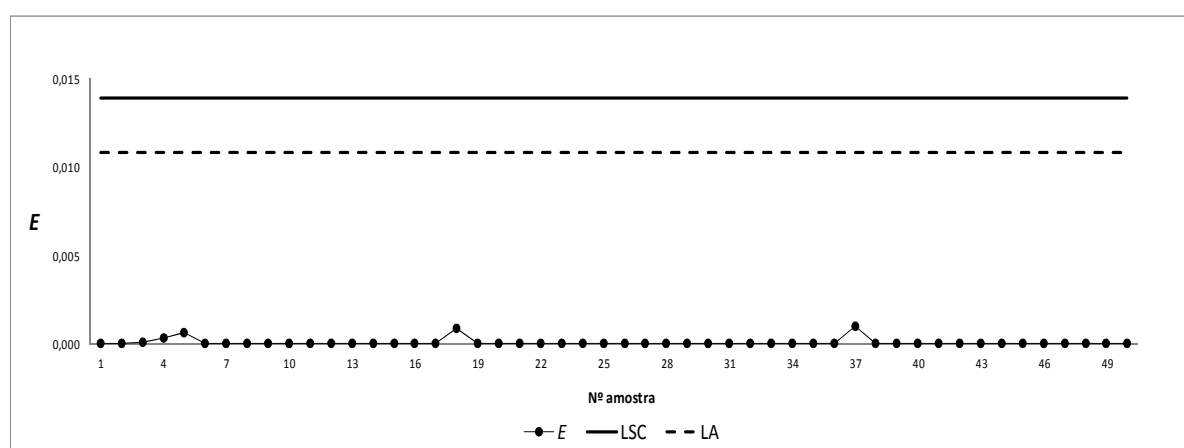


Figura IV.2.2.1 Carta *EWMA* Modificada (ponto 3) para a 1ª perturbação com  $\Delta = 0,5\sigma_{\varepsilon}$

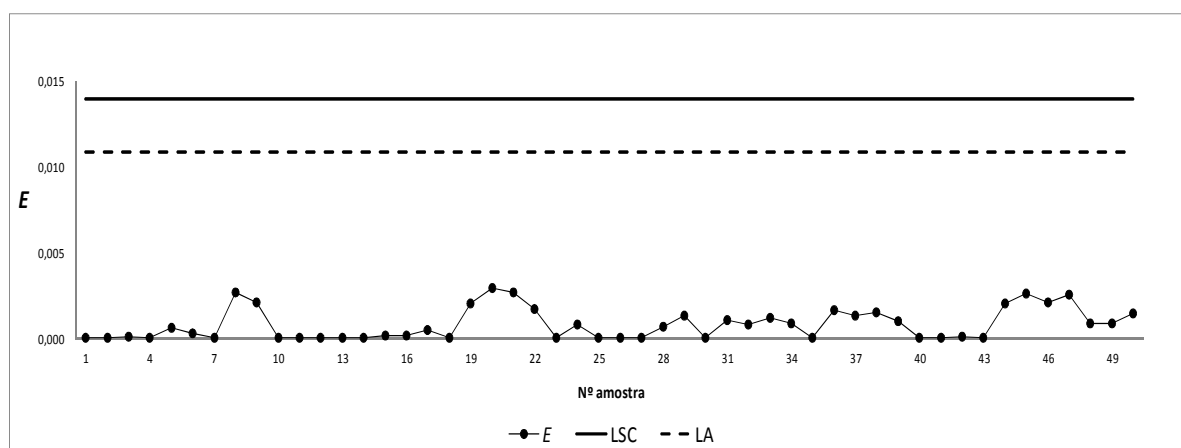


Figura IV.2.2.2 Carta *EWMA* Modificada (ponto 3) para a 2ª perturbação com  $\Delta=0,5\sigma_{\varepsilon}$

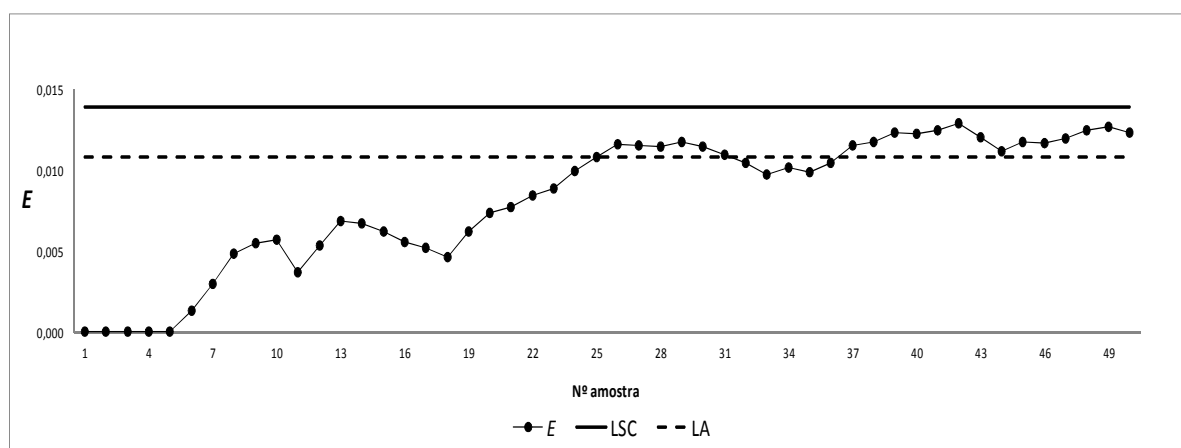


Figura IV.2.2.3 Carta *EWMA* Modificada (ponto 3) para a 3ª perturbação com  $\Delta=0,5\sigma_{\varepsilon}$

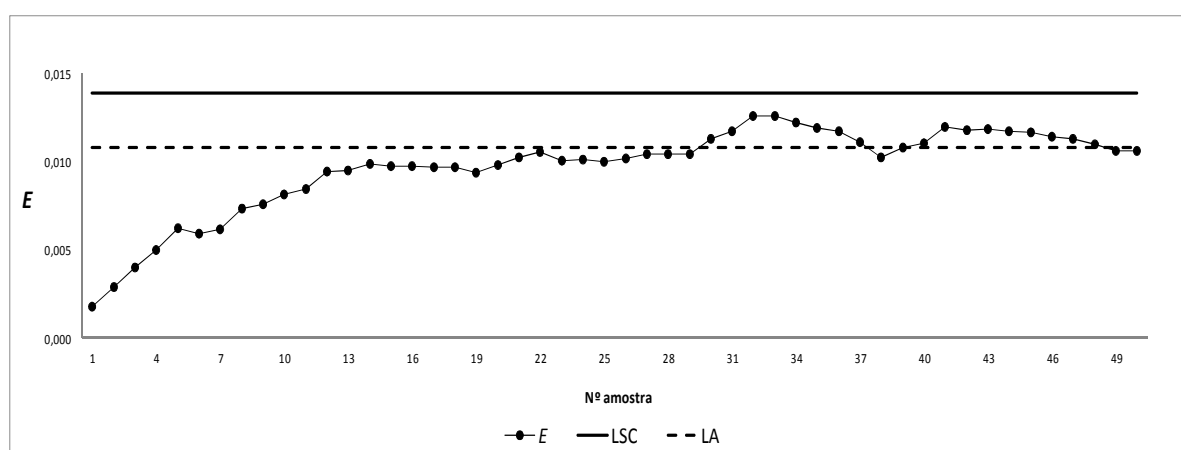


Figura IV.2.2.4 Carta *EWMA* Modificada (ponto 3) para a 4ª perturbação com  $\Delta=0,5\sigma_{\varepsilon}$

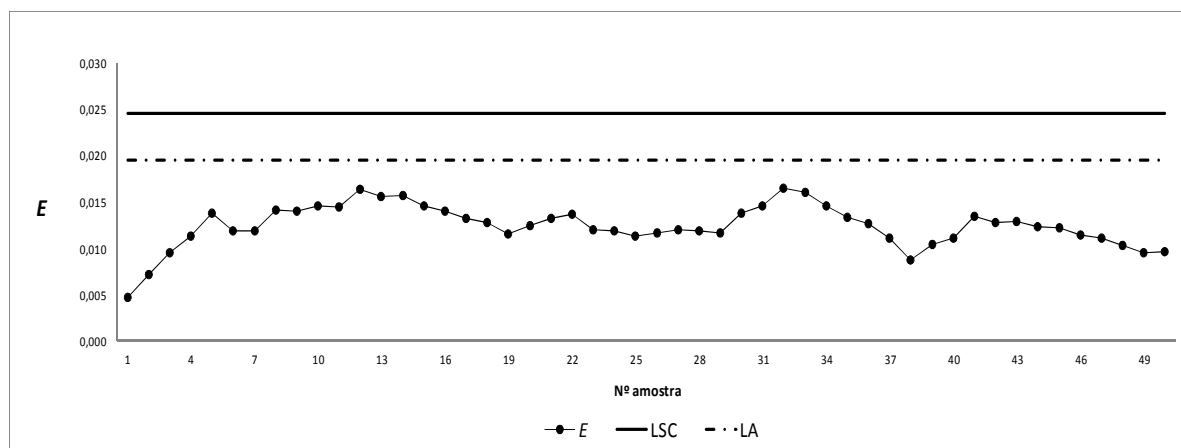


Figura IV.2.2.5 Carta *EWMA* Modificada (ponto 3) para a 4ª perturbação com  $\Delta = 1\sigma_{\varepsilon}$

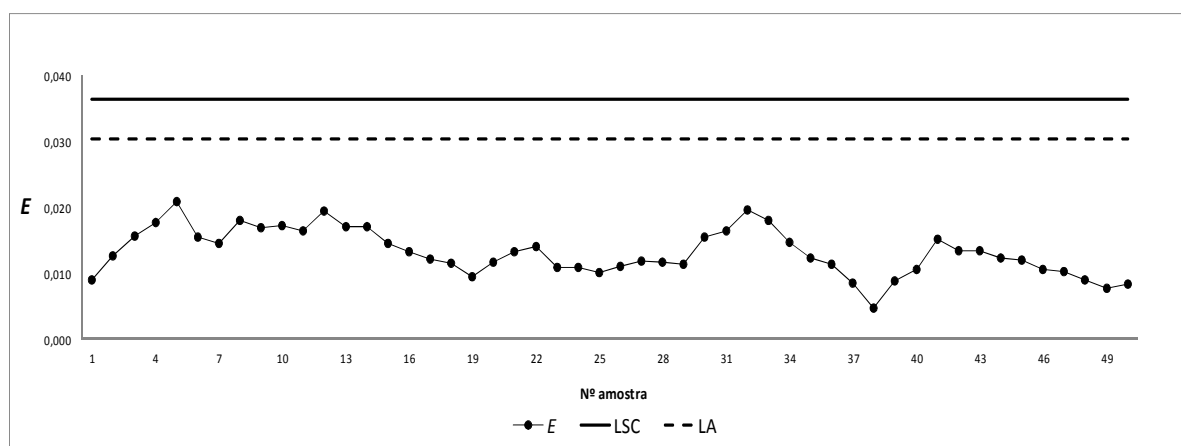


Figura IV.2.2.6 Carta *EWMA* Modificada (ponto 3) para a 4ª perturbação com  $\Delta = 1,5\sigma_{\varepsilon}$

## IV.3 – Resultados do ponto 4

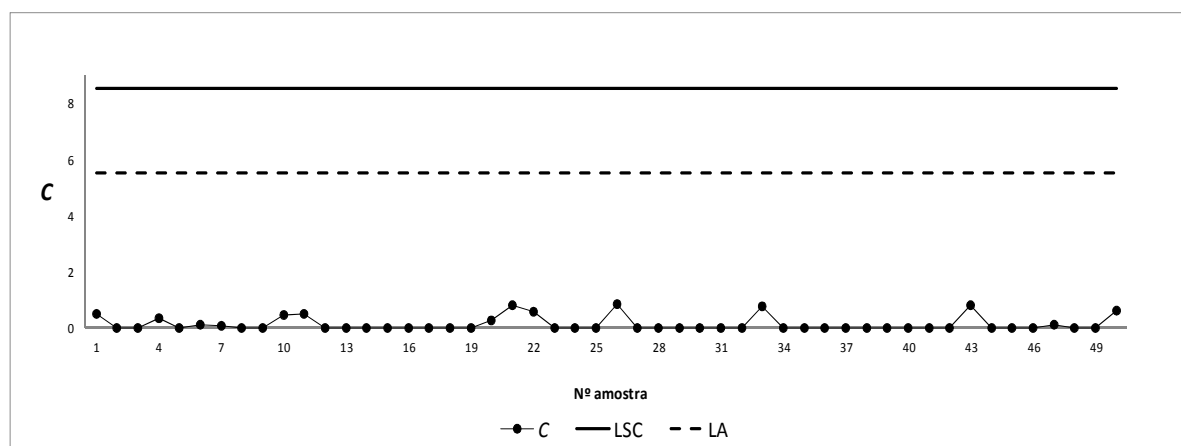
IV.3.1 – Cartas *CUSUM* Modificadas

Figura IV.3.1.1 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 4) para a 1ª perturbação com  $\Delta = 0,5\sigma_{\varepsilon}$

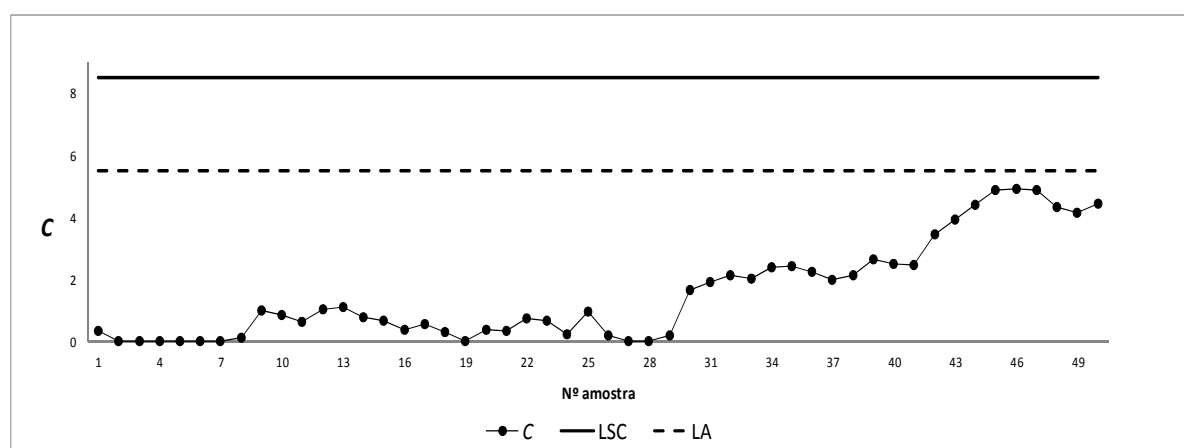


Figura IV.3.1.2 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 4) para a 2ª perturbação com  $\Delta = 0,5\sigma_{\varepsilon}$

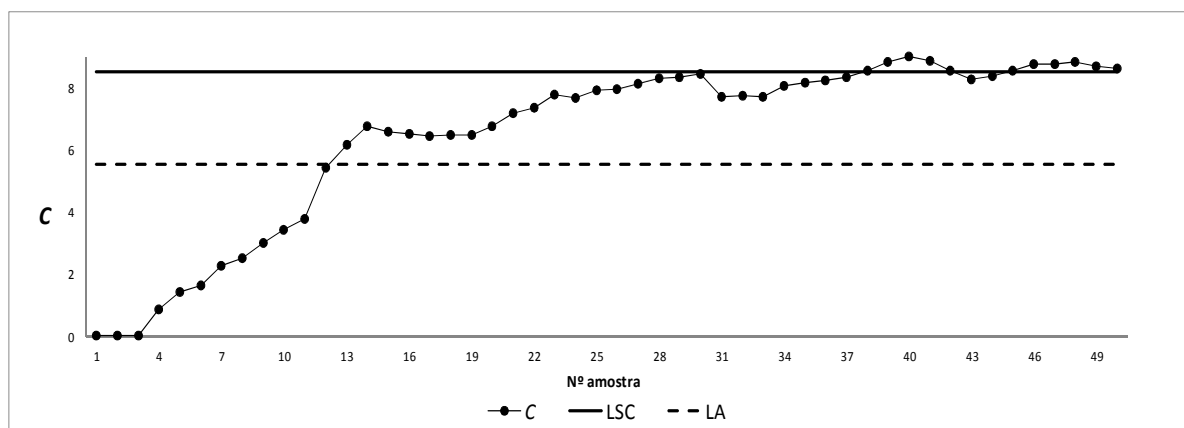


Figura IV.3.1.3 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 4) para a 3ª perturbação com  $\Delta=0,5\sigma_{\varepsilon}$

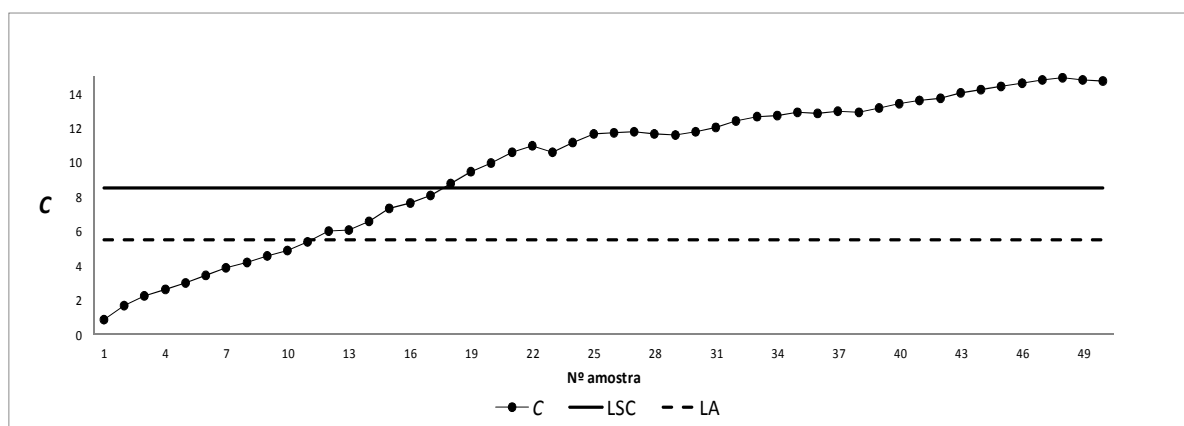


Figura IV.3.1.4 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 4) para a 4ª perturbação com  $\Delta=0,5\sigma_{\varepsilon}$

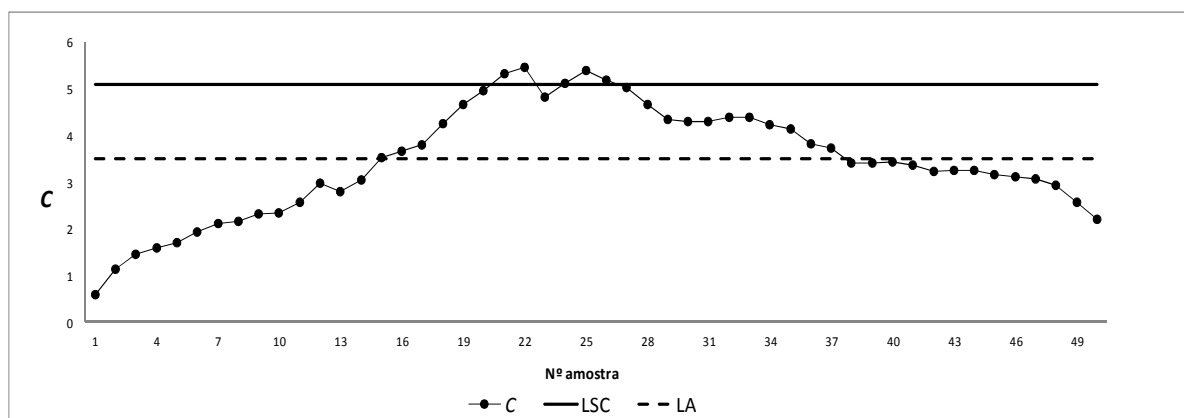


Figura IV.3.1.5 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 4) para a 4ª perturbação com  $\Delta=1\sigma_{\varepsilon}$



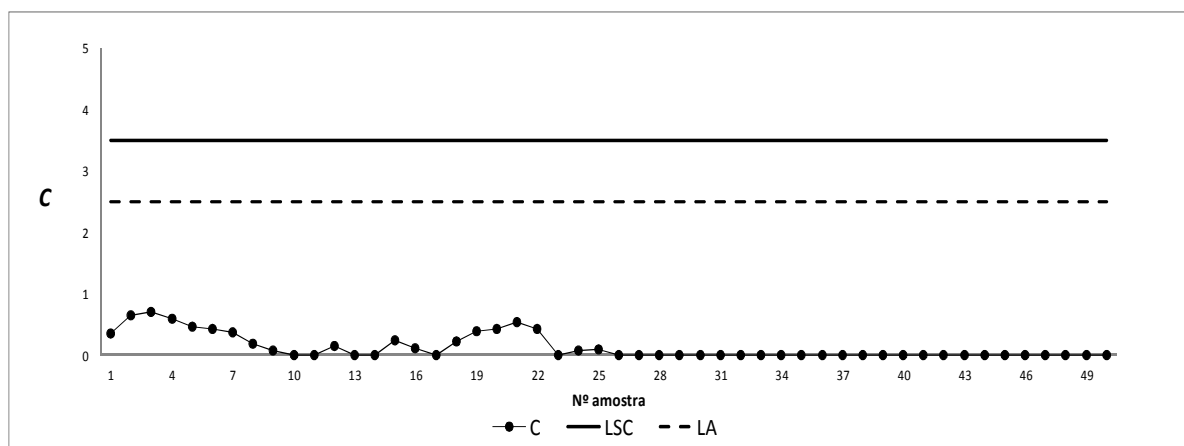


Figura IV.3.1.6 Carta *CUSUM* Modificada (ponto 4) para a 4ª perturbação com  $\Delta = 1,5\sigma_{\varepsilon}$

#### IV.3.2 – Cartas *EWMA* Modificadas

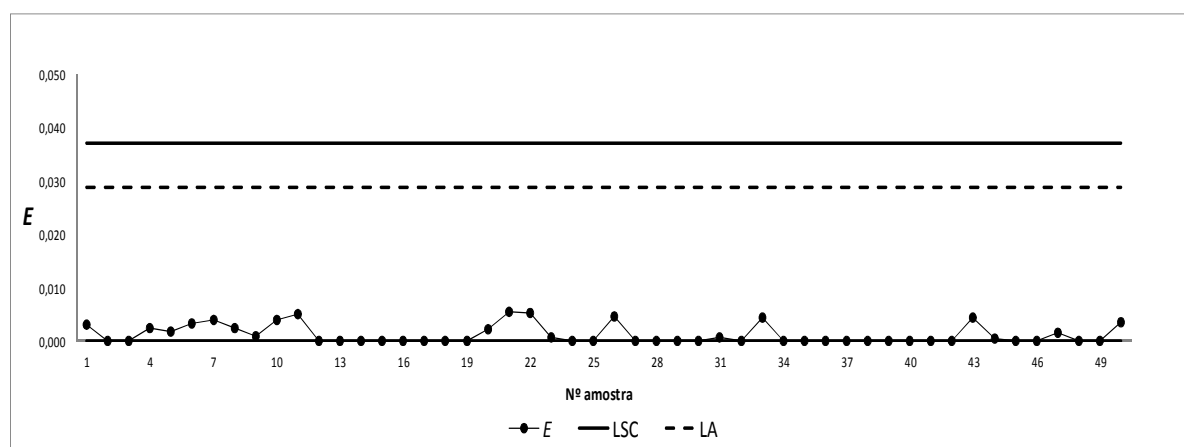
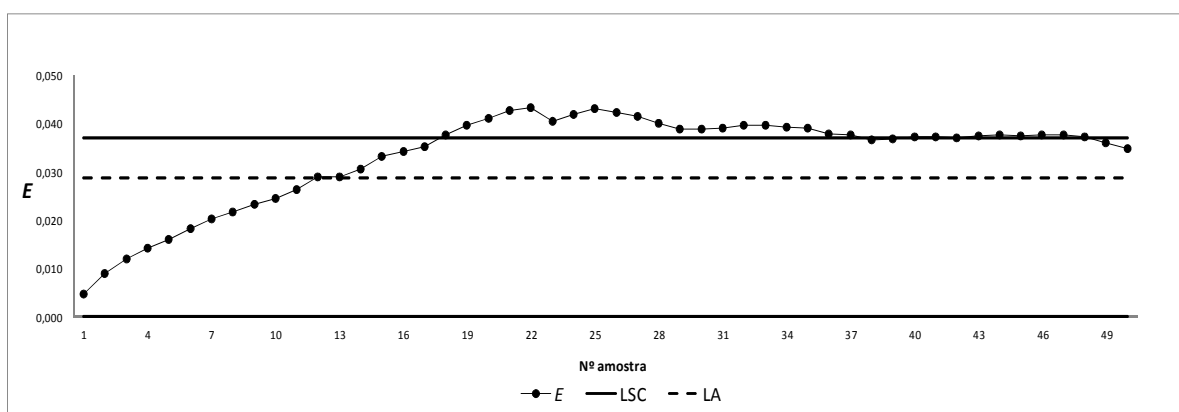
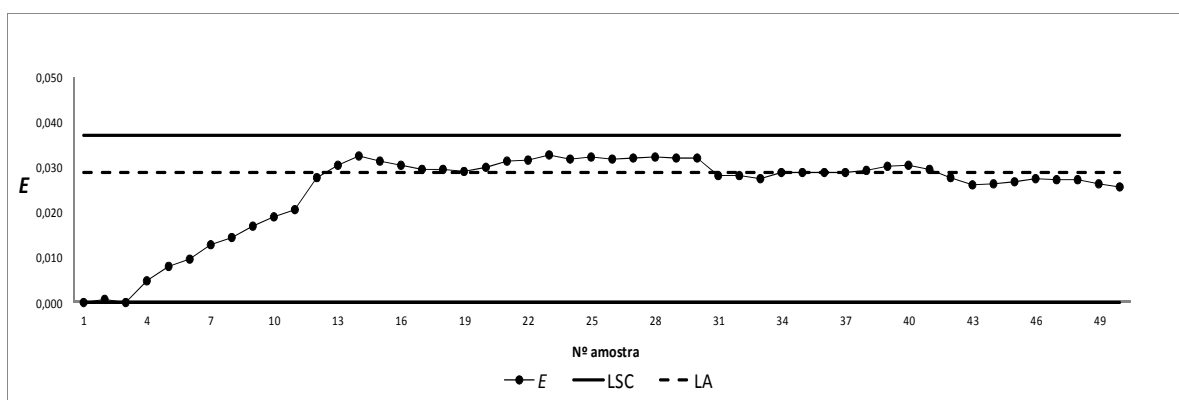
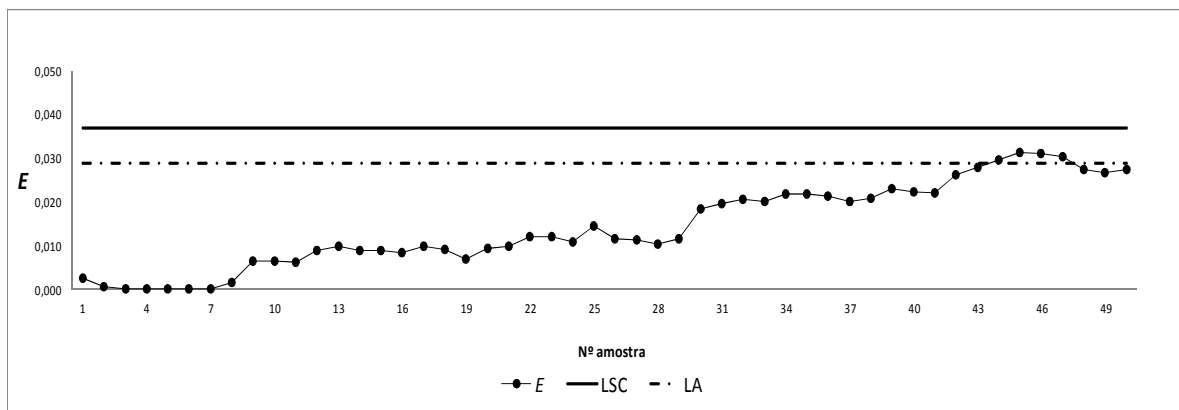


Figura IV.3.2.1 Carta *EWMA* Modificada (ponto 4) para a 1ª perturbação com  $\Delta = 0,5\sigma_{\varepsilon}$



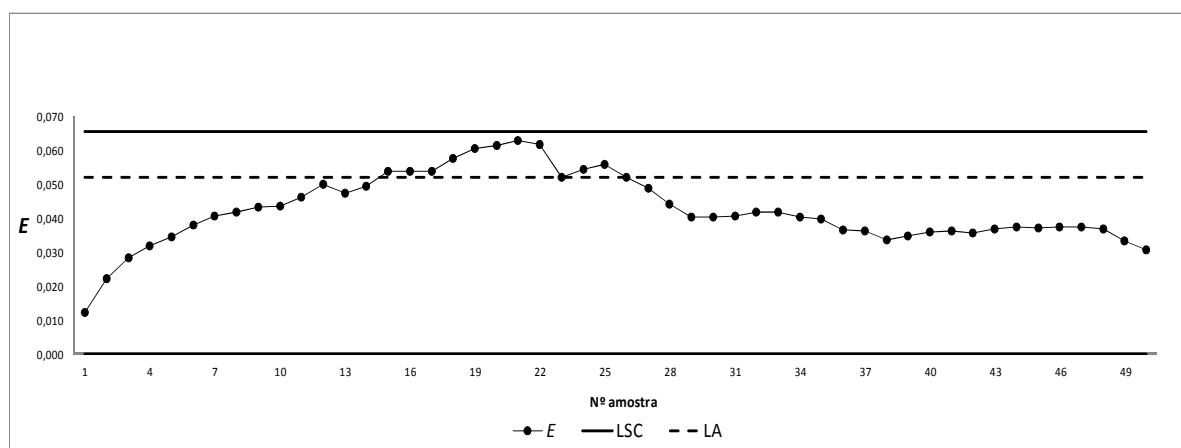


Figura IV.3.2.5 Carta *EWMA* Modificada (ponto 4) para a 4ª perturbação com  $\Delta=1\sigma_{\varepsilon}$

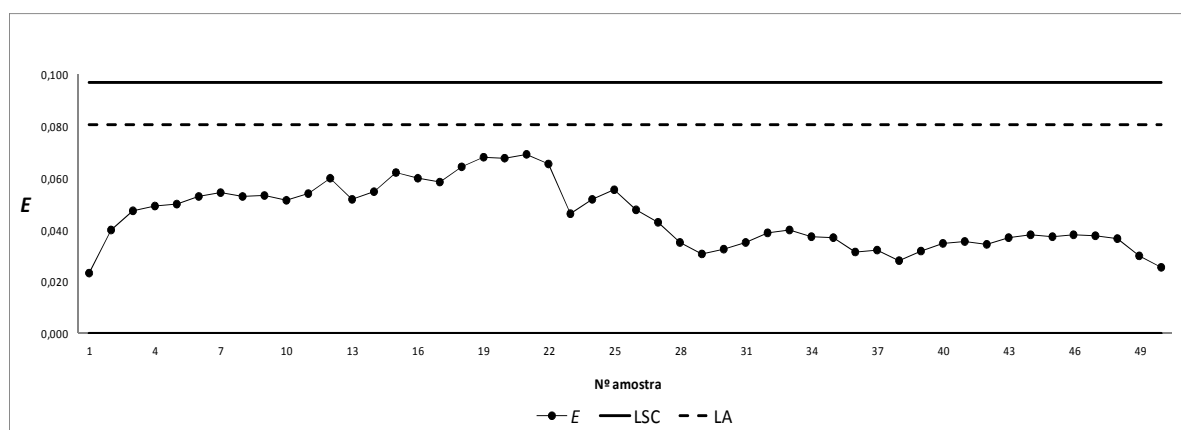


Figura IV.3.2.6 Carta *EWMA* Modificada (ponto 4) para a 4ª perturbação com  $\Delta=1,5\sigma_{\varepsilon}$